

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

## Fakulta strojní

Studijní program B2341 – Strojírenství

Materiály a technologie

Zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

### **Vliv velikosti předdeformace materiálu na hodnoty modulu pružnosti v tahu**

### **Effect of pre-deformation on the values of the tensile modulus (Young's modulus)**

Pavel Jirků

KSP – TP –

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Doubek, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

#### **Rozsah práce a příloh:**

<b>Počet stran:</b>	46
<b>Počet tabulek:</b>	11
<b>Počet příloh:</b>	1
<b>Počet obrázků:</b>	25

**Datum:** 25.05.2012



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení

**Pavel J I R K Ů**

Studijní program

**B2341 Strojírenství**

Studijní obor

**3911R018 Materiály a technologie**

Zaměření

**Tváření kovů a plastů**

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářské práce na téma:

**Vliv velikosti předdeformace materiálu na hodnoty modulu pružnosti v tahu**

### **Zásady pro vypracování:**

(uveďte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Charakteristika modulu pružnosti v tahu a jeho základní význam v technické praxi.
2. Seznámení se s problematikou hodnocení modulu pružnosti kovových materiálů pomocí různých metod.
3. Způsoby ovlivnění velikosti modulu pružnosti v tahu.
4. Experimentální určení vlivu velikosti primární předdeformace materiálu na hodnoty modulu pružnosti v tahu pro vybrané technické materiály s odlišnou velikostí tvařitelnosti.
5. Vyhodnocení naměřených výsledků.
6. Závěr.





Forma zpracování bakalářské práce:

- průvodní zpráva: v rozsahu cca 30 stran
- přílohy: grafy, tabulky

Seznam literatury (uved'te doporučenou odbornou literaturu):

- [1] EN ISO 6892-1: Kovové materiály, Zkoušení tahem, Část 1. Zkoušení za okolní teploty, 2010.
- [2] VELES, P. *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*, Bratislava: Alfa, 1989.
- [3] KUHN, H. *ASM Handbook: Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation (Asm Handbook) (Asm Handbook) (Asm Handbook)*, 10. vyd. Ed. Howard Kuhn a Dana Medlin. [s.l.]: ASM International, 2000 998 s. ISBN 0871703890.
- [4] Dle doporučení vedoucího BP.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Doubek, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.



prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
vedoucí katedry

doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.  
děkan

V Liberci dne 17. 2. 2012

Platnost zadání bakalářské práce je 15 měsíců od výše uvedeného data. ( v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ ). Termíny odevzdání bakalářské práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.



# **A N O T A C E**

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**Fakulta strojní**

**Katedra strojírenské technologie**

**Oddělení tváření kovů a plastů**

Studijní program:	B2341 – Strojírenství
Student:	Pavel Jirků
Téma práce:	Vliv velikosti předdeformace materiálu na hodnoty modulu pružnosti v tahu  Effect of pre-deformation on the values of the tensile modulus (Young's modulus)
Číslo BP:	KSP – TP –
Vedoucí BP:	Ing. Pavel Doubek, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

## **Abstrakt:**

Tato bakalářská práce se zabývá měřením modulu pružnosti v tahu. Cílem práce je zjistit, jak se mění hodnota této materiálové charakteristiky při deformaci, která proběhla v měřeném materiálu před samotným měřením. K zjišťování jsou použity tři druhy materiálů. Vyhodnocení je pak provedeno dvěma způsoby a jejich výsledky jsou porovnány.

## **Abstract:**

This bachelor thesis deals with the measurement of the tensile modulus. The goal is to determine how the value of the modulus changes with deformation that took place in the measured material prior to the actual measurement. Three kinds of materials were used in this thesis. The evaluation is done in two ways and the results are compared.

**Místopřísežné prohlášení:**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 25.05.2012

.....  
Pavel Jirků  
Cihlářská 664  
460 06 Liberec 6

### **Poděkování:**

Na úvod své práce bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Doubkovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D. za jejich odborné rady a připomínky při tvorbě této práce.

Dále bych rád poděkoval své rodině za podporu v celém období mého studia.

## Obsah

1. Úvod .....	8
2. Teoretická část.....	9
2.1. Modul pružnosti .....	9
2.2. Poissonovo číslo .....	10
2.3. Hodnota modulu pružnosti.....	12
2.4. Statické metody určování modulu pružnosti .....	14
2.4.1. Určování modulu pružnosti z diagramu tahové zkoušky .....	14
2.4.2. Určování modulu pružnosti pomocí Martensova zrcátkového průtahoměru .....	15
2.4.3. Určování modulu pružnosti zkouškou ohybem .....	17
2.5. Dynamické metody určování modulu pružnosti .....	18
2.5.1. Určování modulu pružnosti pomocí magnetostrickce .....	18
2.5.2. Určování modulu pružnosti radiotechnickou metodou .....	18
2.5.3. Určování modulu pružnosti Rolland-Sorinovou metodou .....	19
2.6. Přesnosti měření modulu pružnosti .....	21
2.7. Způsoby ovlivnění velikosti modulu pružnosti v tahu .....	22
3. Experimentální část .....	24
3.1. Měřené materiály.....	24
3.2. Zkušební tyč.....	24
3.3. Průběh zkoušky.....	25
3.4. Zpracování výsledků zkoušky.....	28
3.4.1. Zjištění hodnot $R$ a $\epsilon$ .....	28
3.4.2. Hlubokotažný materiál DC05 .....	29
3.4.2.1. Určení modulu $E$ směrnici přímky .....	30
3.4.2.2. Určení modulu $E$ derivací .....	31
3.4.3. Hliníkový materiál AW-5182.....	33
3.4.3.1. Určení modulu $E$ směrnici přímky .....	33
3.4.3.2. Určení modulu $E$ derivací .....	34
3.4.4. Materiál Nirosta 4301 .....	35
3.4.4.1. Určení modulu $E$ směrnici přímky .....	35
3.4.4.2. Určení modulu $E$ derivací .....	36
3.5. Vyhodnocení výsledků zkoušky.....	37
3.5.1. Hlubokotažný materiál DC05 .....	37
3.5.2. Hliníkový materiál AW-5182.....	38
3.5.3. Materiál Nirosta 4301 .....	39
4. Závěr.....	41
5. Seznam použité literatury.....	42
6. Seznam příloh.....	43

## Seznam použitých zkratk a symbolů

Značka	Veličina	Jednotka
$E$	modul pružnosti v tahu	[MPa]
$\sigma$	napětí	[MPa]
$\varepsilon$	poměrné prodloužení	[-]
$G$	modul pružnosti ve smyku	[MPa]
$\tau$	napětí	[MPa]
$\gamma$	smyková deformace	[-]
$p$	hydrostatický tlak	[MPa]
$K$	objemový modul pružnosti	[MPa]
$\Delta$	poměrné stlačení	[-]
$\varepsilon_x$	poměrné prodloužení v ose x	[-]
$\varepsilon_y$	poměrné prodloužení v ose y	[-]
$\varepsilon_z$	poměrné prodloužení v ose z	[-]
$\Delta l$	změna délky	[mm]
$l_0$	původní délka	[mm]
$\Delta b$	změna výšky	[mm]
$b_0$	původní výška	[mm]
$\Delta a$	změna šířky	[mm]
$a_0$	původní šířka	[mm]
$\mu$	Poissonovo číslo	[-]
$V_0$	původní objem	[m <sup>3</sup> ]
$V$	konečný objem	[m <sup>3</sup> ]
$d_0$	původní průměr	[m]
$d$	konečný průměr	[m]
$l$	konečná délka	[m]
$F_0$	počáteční síla	[N]
$F_n$	zatížení	[N]
$S_0$	počáteční průřez	[m <sup>2</sup> ]
$n$	zvětšení	[-]
$a$	délka naměřená na lati	[m]
$\lambda_0$	zvětšené prodloužení	[m]
$A$	vzdálenost zrcadla a dalekohledu	[m]
$V$	výška měřícího hranolu	[m]
$\alpha$	úhel pootočení hranolu	[°]
$y$	průhyb nosníku	[m]
$I$	moment setrvačnosti	[m <sup>4</sup> ]
$\alpha_k$	úhel sklonu křivky pronutí	[°]
$\lambda$	vlnová délka	[m]
$c$	rychlost šíření vlnění	[m/s]
$f$	kmitočet vlnění	[Hz]
$\rho$	měrná váha	[kg/m <sup>3</sup> ]
$N_p$	rezonanční kmitočet podélného kmitání zkoušené tyče	[1/s]
$R$	napětí	[MPa]
$\varepsilon$	poměrné prodloužení vzorku	[-]



## 1. Úvod

Výroba strojních součástí je podmíněna znalostí vlastností materiálu, ze kterého bude součást zhotovena. Jedná se o vlastnosti technologické, mechanické, fyzikální a chemické. Při volbě materiálu musí konstruktér rozhodnout, které vlastnosti budou pro součást rozhodující. Aby toho mohl docílit, musí být zmíněné vlastnosti nějak číselně vyjádřeny. Tím se zabývají materiálové charakteristiky, což jsou číselné hodnoty, které se určují experimentálně a kvantifikují určitou vlastnost materiálu. Proces spočívá ve vytvoření zkušebního tělesa z určitého materiálu a následném pozorování vlivu zatěžování tohoto materiálu vnější silou. Z toho důvodu se mechanické charakteristiky materiálu nedají označit jako absolutní konstanty, jsou to totiž veličiny, které jsou závislé mimo jiné na podmínkách zkoušek. Mezi materiálové charakteristiky patří také *modul pružnosti v tahu*.

Určováním hodnot modulu pružnosti v tahu se bude zabývat tato bakalářská práce. Cílem práce je zjistit, jakým způsobem se mění modul pružnosti v tahu při různých stupních deformace materiálu, která v něm proběhla před samotným měřením.

V teoretické části bude nejprve vysvětleno co je to modul pružnosti, jaké jsou jeho běžné hodnoty u vybraných materiálů a jak se dá ovlivnit jeho velikost. Dále budou v práci uvedeny různé způsoby měření modulu pružnosti a to jak statické, tak dynamické.

V experimentální části bude představen zvolený způsob měření modulu pružnosti, dále budou posány zkoušené materiály a vysvětlen průběh samotného měření. Následovat bude zpracování a vyhodnocení výsledků měření.

## 2. Teoretická část

### 2.1. Modul pružnosti

Modul pružnosti je jednou ze základních materiálových charakteristik. Dá se definovat jako poměr napětí a poměrného prodloužení napětím způsobeného při zatěžování materiálu. Základním vztahem tedy je:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.1)$$

kde      E ... modul pružnosti v tahu [MPa]  
          σ ... napětí [MPa]  
          ε ... poměrné prodloužení [-]

Dle zmíněného vztahu můžeme modul pružnosti E označit jako teoretické napětí, při kterém by se hodnota poměrného prodloužení  $\varepsilon = 1$ . Aby platil uvedený předpoklad, musela by se změna délky rovnat délce původní a materiál by musel být stlačen na nulovou výšku. Ve skutečnosti tohoto stavu dosáhnout nelze, protože pevnost materiálu se vyčerpá podstatně dříve, při nižších hodnotách napětí. [9]

Při namáhání materiálu v něm vznikají dva druhy deformace – elastická (pružná) a plastická (trvalá). Elastická deformace se v materiálu projevuje tak, že po odlehčení vymizí a těleso se vrátí do původního tvaru. Posun atomů v krystalové mřížce kolem jejich rovnovážné polohy je poměrně malý, čímž je vznik elastické deformace umožněn. Průběh síly působící na atomy v blízkosti jejich rovnovážné polohy se dá nahradit přímkovou závislostí, z čehož vyplývá, že závislost mezi napětím a deformací krystalických látek je přímková. Konstanty úměrnosti v těchto závislostech jsou materiálové charakteristiky – moduly pružnosti. Potom tedy platí Hookův zákon, který je definován vztahem (2.1). [1]

V případě smykového napětí platí vztah: [1]

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (2.2)$$

kde      G ... modul pružnosti ve smyku [MPa]  
          τ ... napětí [MPa]  
          γ ... smyková deformace [-]

Dále také platí vztah: [1]

$$p = -K \cdot \Delta \quad (2.3)$$

kde      p ... hydrostatický tlak [MPa]  
          K ... objemový modul pružnosti [MPa]  
          Δ ... poměrné stlačení [-]

## 2.2. Poissonovo číslo

Při namáhání tyče (viz obr. 2.1) se mění její rozměry a to podélné i příčné. Tyč se z původních rozměrů  $l_0$ ,  $a_0$ ,  $b_0$  změní o rozměry  $\Delta l$ ,  $\Delta a$ ,  $\Delta b$ . Po připojení indexů os k jednotlivým poměrným deformacím vznikají vzorce: [3]

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.4)$$

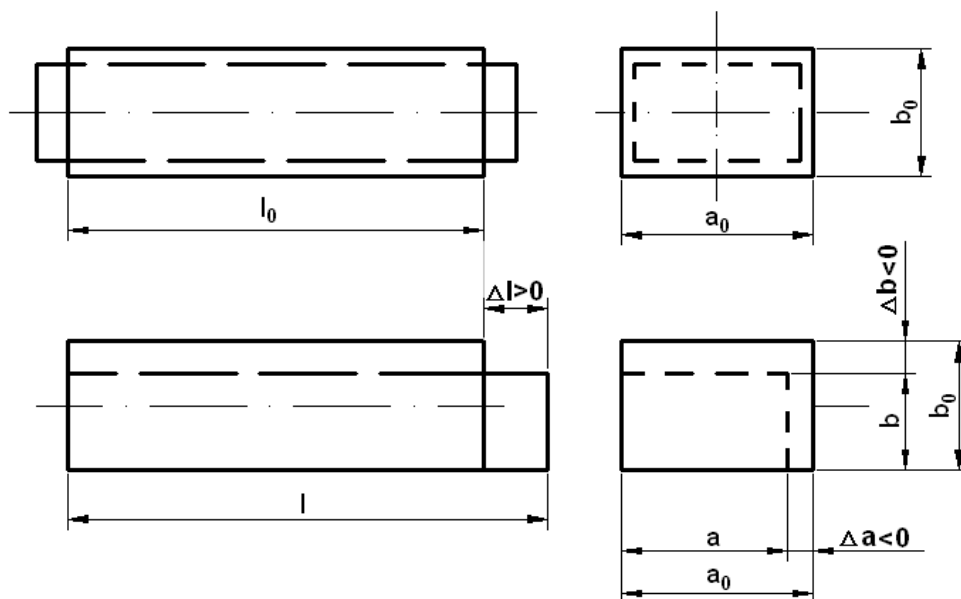
$$\varepsilon_y = \frac{\Delta b}{b_0} \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta a}{a_0} \quad (2.6)$$

$\varepsilon_x$  ... poměrné  
prodloužení v ose x [-]  
 $\Delta l$  ... změna délky [mm]  
 $l_0$  .. původní délka [mm]

$\varepsilon_y$  ... poměrné  
prodloužení v ose y [-]  
 $\Delta b$  .. změna výšky [mm]  
 $b_0$  .. původní výška mm

$\varepsilon_z$  ... poměrné  
prodloužení v ose z [-]  
 $\Delta a$  ... změna šířky [mm]  
 $a_0$  .. původní šířka [mm]



Obr. 2.1: Změna rozměrů tyče při namáhání [3/

Hodnoty  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_z$  vychází záporně, z čehož vyplývá, že se rozměry zmenší, jedná se o poměrné zkrácení. I při jednoosé napjatosti tak dochází k deformaci ve třech směrech. Pokud je materiál izotropní, pak při jednoosé napjatosti platí  $\varepsilon_y = \varepsilon_z$ . Dále pak platí: [3]

$$\varepsilon_y = \varepsilon_z = -\mu \cdot \varepsilon_x \quad (2.7)$$

kde  $\mu$  je součinitel příčného zúžení – **Poissonovo číslo**.

Poissonovo číslo je v oblasti pružných deformací přibližně konstantní. Při jednoosé napjatosti se dá  $\mu$  vypočítat jako poměr příčné a podélné deformace: [3]

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right| \quad (2.8)$$

V případě plastických deformací, kdy předpokládáme, že se nemění objem materiálu, je  $\mu = 0,5$ , tedy hodnota nezávisí na struktuře materiálu. Při elastické deformaci dochází k vychýlení atomů z jejich rovnovážných

poloh a mění se mřížkové parametry, což způsobuje změnu objemu materiálu. [3]

Pomocí Poissonova čísla tak lze vypočítat změnu objemu materiálu při pružném napětí. Původní objem tyče je: [2]

$$V_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \cdot l_0 \quad (2.9)$$

kde  $V_0$  ... původní objem [m<sup>3</sup>]  
 $d_0$  ... původní průměr [m]  
 $l_0$  ... původní délka [m]

Objem po pružné deformaci tahem je: [2]

$$V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot l \quad (2.10)$$

kde  $V$  ... konečný objem [m<sup>3</sup>]  
 $d$  ... konečný průměr [m]  
 $l$  ... konečná délka [m]

Změna objemu pak je: [2]

$$V_k = V - V_0 \quad [\text{m}^3] \quad (2.11)$$

Pomocí Poissonova čísla se dá vyjádřit vztah mezi modulem pružnosti v tahu a modulem pružnosti ve smyku - platí vzorec: [2]

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} \quad (2.12)$$

Hodnoty  $\mu$  jsou tedy závislé na typu vazby a proto je Poissonův poměr zahrnován mezi materiálové charakteristiky pružnosti. [1]

Keramické materiály:  $0,17 \leq \mu \leq 0,36$ .

Kovy:  $0,25 \leq \mu \leq 0,5$ .

Mechanické vlastnosti pružnosti jsou popisovány těmito charakteristikami: modulem pružnosti v tahu  $E$ , modulem pružnosti ve smyku  $G$ , objemovým modulem pružnosti  $K$  a Poissonovým číslem  $\mu$ . U izotropních materiálů mezi nimi platí: [1]

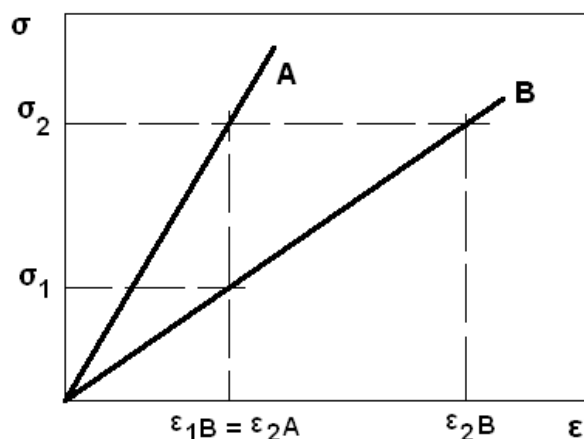
$$E = 2 \cdot G \cdot (1 + \mu) = 3 \cdot K \cdot (1 - 2 \cdot \mu) \quad (2.13)$$

U kovových materiálů bylo experimentálně zjištěno, že moduly  $E$  a  $K$  vyházejí číselně stejně. Z toho vyplývá, že pro většinu kovů je hodnota  $\mu = 0,33$ .

Na základě uvedených poznatků, se dá za nejdůležitější a nejčastěji měřenou materiálovou charakteristiku, která určuje elastické chování a tuhost součásti označit **modul pružnosti v tahu  $E$** . [1]

### 2.3. Hodnota modulu pružnosti

Materiály, které pro dosažení určité deformace potřebují dosáhnout vyššího napětí mají vyšší modul pružnosti v tahu. Závislost napětí-poměrné prodloužení ( $\sigma$ – $\epsilon$ ) je tedy strmější. Obrázek 2.2 ukazuje, že při stejném napětí má materiál 'B' podstatně vyšší deformaci než materiál 'A', přičemž modul pružnosti má materiál 'A' vyšší než materiál 'B'. [9]



Obr. 2.2: Diagram  $\sigma - \epsilon$  dvou materiálů s rozdílným modulem pružnosti E (A – materiál s vysokým modulem E, B – materiál s nízkým modulem E) /9/

Hodnoty modulu pružnosti jsou závislé na typu vazby a na uspořádání atomů v prostoru, tedy typu krystalové mřížky. U monokrystalů jsou hodnoty modulu pružnosti výrazně závislé na orientaci napětí vůči krystalografickým směrům – jedná se o anizotropii elastických charakteristik. Ta se také nachází u materiálů s uspořádanou strukturou, například u amorfních plastů nebo kompozitních materiálů, které obsahují vlákna. [1]

Většina kovů používaných v praxi má polykrystalickou strukturu a jednotlivá zrna jsou náhodně orientována. Elastické charakteristiky polykrystalických materiálů na směr působícího napětí nezávisí a jsou tak izotropní. [1]

Tab. 2.3: Moduly pružnosti vybraných materiálů /1/

MATERIÁL	MODUL E [MPa]	MATERIÁL	MODUL E [MPa]
<b>Keramika – kovalentní vazba</b>		<b>Kovy – kovová vazba (teplota tání)</b>	
Diamant	$10^6$	Wolfram (3410 °C)	$4,1 \cdot 10^5$
Karbid wolframu	$(4,5 - 6,5) \cdot 10^5$	Molybden (2610 °C)	$(3,2 - 3,6) \cdot 10^5$
Karbid křemíku	$4,5 \cdot 10^5$	Železo (1538 °C)	$(1,9 - 2,1) \cdot 10^5$
<b>Keramika – iontová vazba</b>		Měď (1085 °C)	$(1,2 - 1,5) \cdot 10^5$
Korund $Al_2O_3$	$3,9 \cdot 10^5$	Hliník (660 °C)	$(6,9 - 7,9) \cdot 10^4$
Křemenné sklo	$9,4 \cdot 10^4$	Olovo (327 °C)	$1,4 \cdot 10^4$
Sodné sklo	$6,9 \cdot 10^4$	<b>Plasty – směs</b>	
<b>Keramika – sekundární vazba</b>		Nylon	$(2-4) \cdot 10^3$
Led, $H_2O$	$9,1 \cdot 10^3$	Polyetylén	$7 \cdot 10^2$
		Pryž	10 – 100

Z tabulky 2.3 je vidět, že hodnota modulu pružnosti souvisí s typem vazby a zároveň i s prostorovým uspořádáním atomů. U primárních vazeb je nejpevnější vazba kovalentní, následuje vazba iontová a kovová. Díky tomu má nejvyšší modul pružnosti diamant, ve kterém jsou atomy uhlíku spojeny kovalentní vazbou. [1]

V pravé části tabulky 2.3 můžeme vidět závislost teploty tání kovů na modulu pružnosti. Čím je teplota tání vyšší, tím je vyšší i modul, neboli při pevnější vazbě je potřeba vyšší teploty na rozrušení vazby a vznik kapalné fáze. [1]

Sekundární vazbu v tabulce 2.3 reprezentuje krystal ledu a je zřejmé, že hodnota modulu pružnosti, v porovnání s materiály tvořenými primární vazbou, je o řád nižší. [1]

U pevných látek by se z teoretického hlediska měla hodnota modulu pružnosti pohybovat v rozmezí od  $10^3$  do  $10^6$  MPa. Nižší hodnoty se vyskytují pouze u plastů a to z toho důvodu, že jejich základní strukturní jednotkou je molekula, zatímco u krystalů je tomu atom. Vazby, které tvoří jednotlivé molekuly jsou sice kovalentní, ale mezi molekulami je vazeb méně, nebo při teplotách nad teplotou skelného přechodu  $T_g$  nejsou vůbec. Pod teplotou  $T_g$ , kdy se aktivují sekundární vazby mezi molekulami, hodnoty modulu pružnosti již odpovídají teoretickému rozmezí hodnot E. [1]

V tabulce 2.4 jsou uvedeny hodnoty modulů pružnosti pro některé kovy. Z tabulky je vidět, že hodnoty elastických modulů kovových krystalů se mohou lišit a to proto, že jsou výrazně elasticky anizotropní. Technické kovové materiály jsou většinou polykrystalické a zmíněná anizotropie u nich mizí. [10]

U ideálního tuhého tělesa se působením napětí ihned projevuje deformace a při zpětném poklesu napětí na nulovou hodnotu, deformace hned mizí. V reálných tuhých látkách se však deformace opoždí za napětím. Vzniká jev, který se jmenuje anelasticita a definuje se jako časově závislá velikost pružné deformace materiálů. [10]

Tab. 2.4: Anizotropie modulů pružnosti E a G vybraných kovů /10/

Kov	Modul pružnosti E [GPa]			Modul pružnosti G [GPa]		
	max.	min.	izotropní	max.	min.	izotropní
<b>Fe</b>	289	135	210	119	61	84
<b>Cu</b>	196	68	113	98	32	46
<b>Zn</b>	127	35	103	50	28	39
<b>Al</b>	77	64	70	29	25	27
<b>Mg</b>	52	44	44	18	17	17

## 2.4. Statické metody určování modulu pružnosti

### 2.4.1. Určování modulu pružnosti z diagramu tahové zkoušky

Tahová zkouška je pro svou jednoduchost a účelnost považovaná za základní mechanickou zkoušku materiálu. Její výhodou oproti zkoušce tlakové nebo ohybové je to, že tahovým namáháním je možné porušit jakýkoliv materiál. Zkouška spočívá v roztrhnutí zkušební tyče upnuté v trhacím stroji, zaznamenání trhacího diagramu a zjištění napěťových a deformačních charakteristik. Trhací diagram může být zaznamenán v různých formách, například závislost *síla – prodloužení* nebo *napětí – poměrné prodloužení*. [6]

Lineární část zmíněného diagramu určuje velikost modulu pružnosti v tahu. Vypočítá se ze vztahu: [6]

$$E = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{(F_n - F_0) \cdot L_0}{(\Delta L_n - L_0) \cdot S_0} \quad (2.14)$$

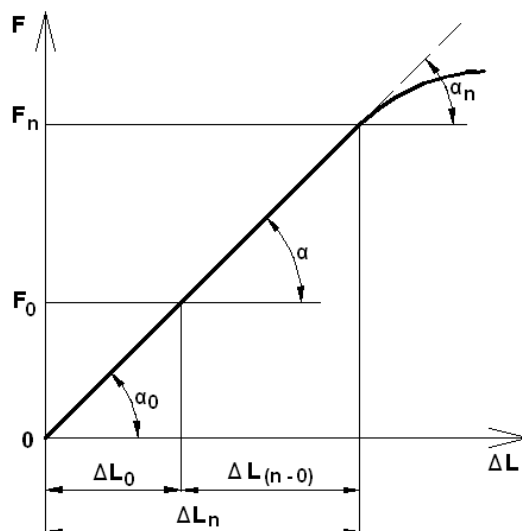
kde  $F_0$  ... počáteční síla, kterou je zatížena zkušební tyč z důvodu eliminování nepřesností měřících přístrojů [N]

$F_n$  ... příslušné zatížení [N]

$L_0$  ... počáteční délka [m]

$S_0$  ... počáteční průřez [m<sup>2</sup>]

Při měření neuvažujeme prodloužení  $\Delta L_0$  při síle  $F_0$ , proto se musí od celkového prodloužení odečíst. V lineárním úseku diagramu se zkušební tyč několikrát zatíží a odlehčí, přičemž se změří deformace  $\Delta L_n$ , která odpovídá příslušnému zatížení  $F_n$ . Do uvedeného vztahu (2.14) se pak dosadí aritmetický průměr hodnot  $\Delta L_n$  a  $F_n$ . [6]



Obr. 2.5: Údaje na lineární části diagramu tahové zkoušky pro zjištění modulu pružnosti E [6]

Pokud se provádí zkouška bez odlehčování, je základem pro výpočet modulu prodloužení celkové, které je o něco větší než prodloužení pouze pružné, které se dá zjistit zkouškou s odlehčováním. Z toho důvodu je při zkoušce bez odlehčování výsledný modul o 3 až 4% menší. [2]

### 2.4.2. Určování modulu pružnosti pomocí Martensova zrcátkového průtahoměru

Pro zjištění modulu pružnosti je potřeba změřit velmi malé deformace v průběhu zatěžování zkušební tyče. Měřicí zařízení u běžných trhacích strojů nepracují s dostatečnou přesností, a proto se pro měření velmi malých deformací využívají přístroje, kterým se říká průtahoměry. Ty pracují tak, že se upnou na zkoušenou tyč a přímo ukazují okamžitou deformaci. [6]

Podle principu měření je můžeme rozdělit na:

- a) mechanické
- b) opticko-mechanické
- c) elektrické.

Základním principem mechanických průtahoměrů je mechanický převod absolutní hodnoty deformace tyče  $\Delta L$ . Ve vzdálenosti  $L_0$  je na zkušební tyči upnuta snímací část průtahoměru a konec převodu pak vychyluje ručičku ukazující deformaci. Mrtvý chod, tření, vlastní váha pák a celého přístroje jsou důvody, proč mechanické průtahoměry nevyhovují pro přesná měření velmi malých deformací. Proto se využívají průtahoměry mechanicko-optické, z nichž nejznámější je Martensův zrcadlový průtahoměr, který pracuje na principu mechanického natáčení zrcadla (viz dále). Elektrické průtahoměry pak můžeme rozdělit podle principu jejich práce na tenzometrické, indukční a kapacitní. [4], [6]

#### Martensův zrcátkový průtahoměr

Průtahoměr se skládá ze dvou tuhých přílozek opatřených na jednom konci pevným břitem a na druhém ložiskem pro volné hranolové břity, na kterých je uchyceno zrcadlo. Zrcadlo se může otáčet podle vodorovné i svislé osy. Na zkušební tyči jsou vyznačeny jemné rysky, označující měřenou délku. Dotyk přístroje se zkoušenou tyčí je pak zajištěn zaklesnutím břitů do vyznačených rysek. Pro přesné nastavení jsou potom pružinovou sponou upnuty příložky. Ve vzdálenosti  $A$  (viz obr. 2.6) je před každé zrcadlo umístěn dalekohled a vedle něj lať s milimetrovým dělením. Pomocí dalekohledu je pak pozorováno zrcadlo, v němž se odráží část stupnice na lati. Zrcadlo se nastaví, aby obraz dělení na lati byl rovnoběžný s horizontální nitkou kříže okuláru dalekohledu. [4]

Zkušební tyč je potom zatížena, prodlouží se o délku  $\lambda$  a měřicí hranol se spolu se zrcadly pootočí o úhel  $\alpha$ . Od vychýleného zrcadla se odráží světelný paprsek, který s osou dalekohledu svírá úhel  $2\alpha$ . Před a po zatížení je z lati odečtena délka  $a$ , která je rovna zvětšenému prodloužení  $\lambda = v \cdot \sin \alpha$ , kde  $v$  je výška měřicího hranolu a  $\alpha$  je úhel pootočení hranolu. Potom platí geometrické vztahy: [4]

$$n = \frac{a}{\lambda} = \frac{A \cdot \operatorname{tg} 2\alpha}{v \cdot \sin \alpha} \quad (2.15)$$

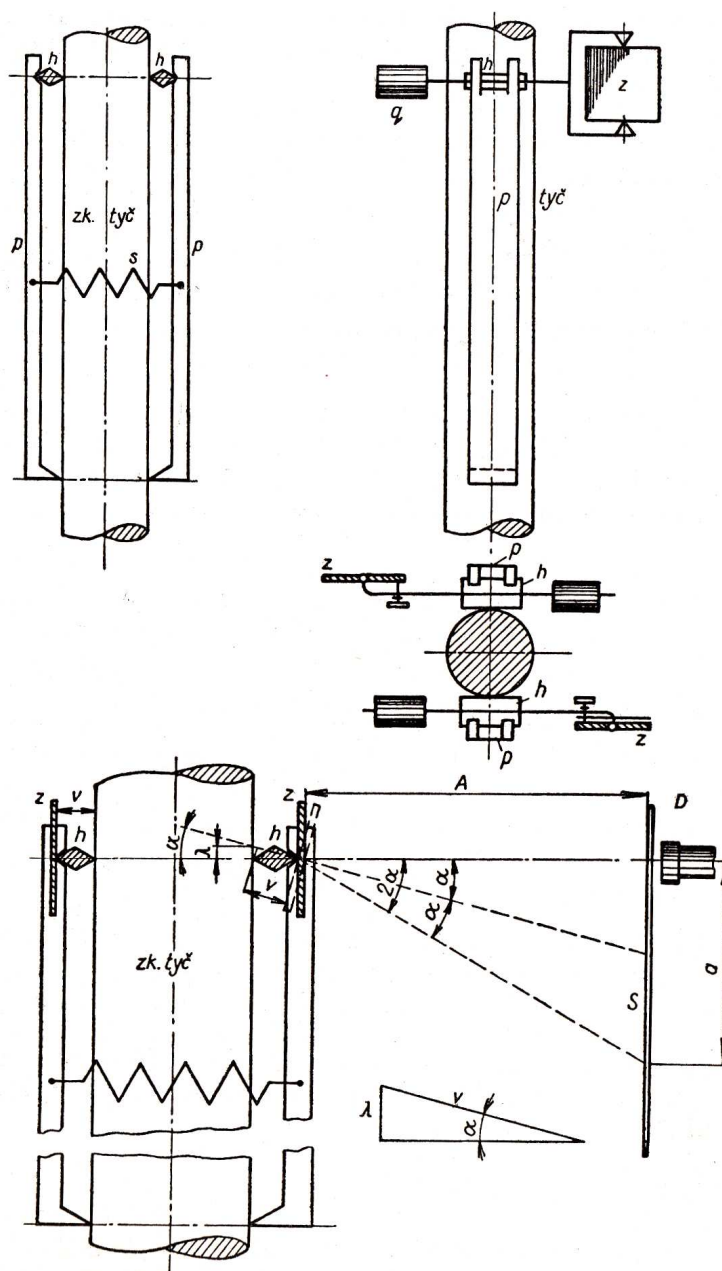
kde	$n$	... zvětšení [-]
	$a$	... délka naměřená na lati [m]
	$\lambda_0$	... zvětšené prodloužení [m]
	$A$	... vzdálenost zrcadla a dalekohledu [m]
	$V$	... výška měřicího hranolu [m]
	$\alpha$	... úhel pootočení hranolu [°]



Úhel  $\alpha$  je vždy malý a můžeme tak pro zjednodušení počítat:  $\sin \alpha \cong \operatorname{tg} \alpha$  a  $\operatorname{tg} 2\alpha \cong 2 \cdot \operatorname{tg} \alpha$ , potom zvětšení  $n$  vychází: [4]

$$n = \frac{a}{\lambda} \cong \frac{2 \cdot A}{v} \quad (2.16)$$

Případnému vlivu ohybu tyče na přesnost měření je snaha zamezit tak, že se měření provádí dvěma zrcadly a dvěma dalekohledy na dvou protilehlých koncích tyče. Pokud obě měření vykazují velké rozdíly, je to způsobeno nepřesností upnutí tyče. Chyba měření také vzniká díky zjednodušení výpočtu, maximálně dosahuje hodnoty 3%. Tomu se dá zamezit následným výpočtem korekce měření, ale to je považováno za zbytečné. [4]



Obr. 2.6: Schéma Martensova zrcátkového průtahoměru /4/

### 2.4.3. Určování modulu pružnosti zkouškou ohybem

Při zkoušce ohybem, se dosahuje mnohem vyšších deformací než při tahové zkoušce.[2]

Všeobecně má zkouška ohybem menší význam, než ostatní mechanické zkoušky. Nejvíce se s její pomocí měří vlastnosti šedé litiny a některých druhů nástrojových ocelí. [6]

Zkouška spočívá v zatížení nosníku délky  $l$ , který je na obou koncích podepřen a uprostřed zatížen silou  $F$ . Podle obecné mechaniky platí pro prohnutí nosníku  $y$  vztahy: [4]

$$y = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad (2.17)$$

kde  $y$  ... průhyb nosníku [m]  
 $F$  ... zatěžovací síla [N]  
 $l$  ... délka nosníku [m]  
 $E$  ... modul pružnosti v tahu [Pa]  
 $I$  ... moment setrvačnosti [m<sup>4</sup>]

$$\operatorname{tg} \alpha \cong \alpha = \frac{F \cdot l^2}{16 \cdot E \cdot I} \quad (2.18)$$

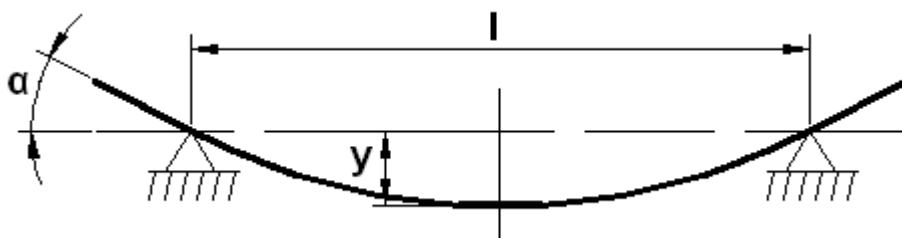
kde  $\alpha$  ... úhel sklonu křivky prohnutí [°]

Vztah (2.18) pak lze použít pro stanovení modulu pružnosti:

$$E = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot I \cdot y} = \frac{F \cdot l^2}{16 \cdot I \cdot \operatorname{tg} \alpha} \quad (2.19)$$

Průhyb nosníku je funkcí tuhosti a rozměrů vzorků. Pokud má vzorek odlišný modul pružnosti v tahu a tlaku, je modul pružnosti při ohybové zkoušce funkcí obou modulů. [4]

Kromě ohybového napětí se ještě průhyb snaží zvětšit také stříhové napětí. U vzorků s poměrem délka/výška větším než 10 jsou smykové deformace zanedbatelné. [4]



Obr. 2.7: Prostý nosník, používaný při zkoušce ohybem /4/

## 2.5. Dynamické metody určování modulu pružnosti

Výhodou dynamických zkoušek k určení modulu pružnosti je, že probíhají při velmi nízkých napětích, menších než 1 MPa. To znamená, že napětí leží pod fyzikální mezí pružnosti a odpadají tak vlivy dopružování apod. [2]

### 2.5.1. Určování modulu pružnosti pomocí magnetostrikce

Pro zjištění modulu pružnosti feromagnetických kovů se dá použít metoda, při které dochází ke změně rozměrů materiálu díky magnetizaci zkoušené tyče. Dochází k jevu, který se nazývá magnetostrikce. Zkoušená tyč je vložena do osy cívky, která je napájena vysokofrekvenčním střídavým proudem. Magnetostrikcí se tyč uvede do podélného kmitání s maximální amplitudou v resonanci vlastních kmitů s kmitočtem budícího proudu. Délka tyče pak ovlivňuje kmitočet na koncích tyče. Z důvodu, že délka tyče je mnohonásobně větší než její příčné rozměry, můžeme zanedbat Rayleighovu korekci. Potom platí vztah: [4]

$$l = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2 \cdot f} = \frac{1}{2 \cdot f} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.20)$$

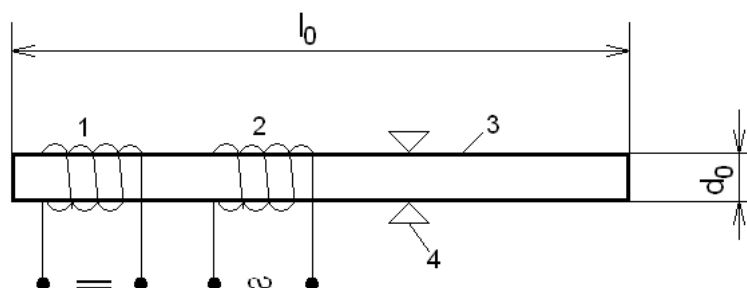
kde	l	... délka tyče [m]
	$\lambda$	... vlnová délka [m]
	c	... rychlost šíření vlnění [m/s]
	f	... kmitočet vlnění [Hz]
	$\rho$	... měrná váha [kg/m <sup>3</sup> ]
	E	... modul pružnosti v tahu [Pa]

Z toho vyplývá vztah pro určení modulu pružnosti v tahu:

$$E = 4 \cdot l^2 \cdot f^2 \cdot \rho \quad (2.21)$$

Tato metoda se dá použít i na látky, které nejsou feromagnetické. K jejich rozkmitání se přitom použije mechanické spojení s kmitacím magnetostrikčním generátorem. [4]

### 2.5.2. Určování modulu pružnosti radiotechnickou metodou



Obr. 2.8: Schéma radiotechnického buzení podélných kmitů /5/

Na obrázku 2.8 je schéma radiotechnické metody. Číslo 1 označuje cívku se stejnosměrným proudem, která je trvalý magnet, číslo 2 značí cívku se střídavým proudem z elektronkového oscilátoru, jehož frekvence je snadno regulovatelná. Jako č. 3 je označena zkušební tyč a 4 je čelist, která svírá zkoušenou součást přesně v polovině její délky. Ve zkušební tyči indukují vířivé proudy z proudu z cívky 2, které spolu se stálým polem elektromagnetu z cívky 1 způsobí vznik podélného kmitání tyče. Kmitočty oscilátoru a zkoušené tyče se spolu vyladí, což způsobí resonanci tyče. Tento stav je potom snadno slyšitelný, protože se projeví silným rozezvučením tyče. V ten okamžik se na stupnici oscilátoru odečte jeho rezonanční kmitočet. Modul pružnosti v tahu pak zjistíme dle vzorce: [5]

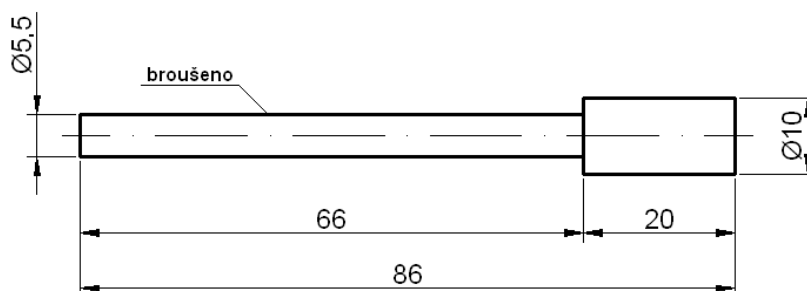
$$E = \frac{4 \cdot l_0^2 \cdot \rho \cdot N_p^2}{g} \quad (2.22)$$

kde  $l_0$  ... délka tyče [m]  
 $\rho$  ... hustota materiálu [kg/m<sup>3</sup>]  
 $N_p$  ... rezonanční kmitočet podélného kmitání zkoušené tyče [1/s]  
 $g$  ... tíhové zrychlení [m/s<sup>2</sup>]  
 $E$  ... modul pružnosti v tahu [Pa]

Výhodou tohoto způsobu je jeho jednoduchost a přesnost. Chyba měření se pohybuje od 0,1 do 0,3%. Nevýhodou je nutnost velké délky zkušebních tyčí, případně cena radiotechnického zařízení. [5]

### 2.5.3. Určování modulu pružnosti Rolland-Sorinovou metodou

Mezní hodnoty modulu pružnosti mají u litin téměř dvakrát větší rozptyl, než je tomu u ocelí. A právě u litin je modul pružnosti doporučován jako nejsprávnější ukazatel jakosti. Jeho měření však není snadné. Určení modulu například zkouškou tahovou s dostatečnou přesností je téměř nemožné. U obvyklých metod určování modulu se používají poměrně velká napětí, důsledkem toho pak přesnost měření ovlivňuje odpružení. Díky tomu má i čas vliv na přesnost měření. Metoda Rolland-Sorinova se tomu snaží zamezit. [4]



Obr. 2.9: Rozměry zkušební tyče pro Rolland-Sorinovu metodu [4]

Metoda k měření využívá Savartovo sympatické kyvadlo. To je tvořené dvěma stejnými kyvadly, která jsou přidělána na měřenou součást pomocí společného nosníku. Součást je pak připevněna k upínací hlavě. [4]

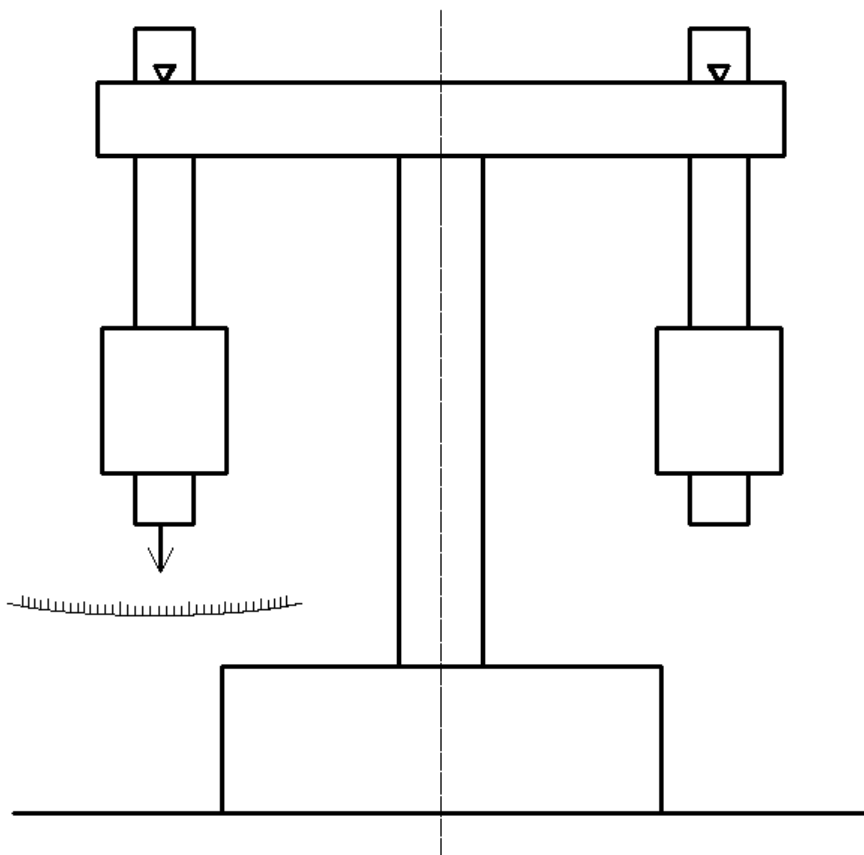
Postup měření spočívá v tom, že když jedno kyvadlo vychýlíme z rovnovážné polohy, druhé se samostatně rozpohybuje také. Zatímco

amplituda druhého kyvadla roste, amplituda prvního klesá, než se zastaví a právě v ten moment dosáhne amplituda druhého kyvadla maximální hodnoty. Tento děj se potom cyklicky opakuje až do doby, kdy je amplituda kyvů malá a cykly se stanou neznatelnými. To je způsobeno ztrátou energie, která je ovlivněna odporem vzduchu, třením břitů v závěsech a také absorpcí energie ve zkušební tyči. [4]

Kyvadla na zkušební tyč působí stejnými střídavými silami. Vznikající deformace na tyči jsou velmi malé, takže platí Hookův zákon. Perioda cyklů, tedy časový interval mezi dvěma následujícími stavy, je v určitém vztahu k modulu pružnosti, který je přibližně lineární. Výsledný modul pružnosti pak vychází s přesností 0,5%, což je přesnost, kterou nezaručí ani zrcátkové průtahoměry. [4]

Výhodou této metody je, že není potřeba měřit napětí a deformaci, stačí pouze změřit čas. Nevýhodou je, že se jedná o měření nepřímé. Podle srovnání měření touto metodou a metodou Martensovou, dává tato metoda výsledky o 3 až 4% menší, což je podle autora zkoušky způsobené nepřesností Martensovy metody. [4]

Samotné měření spočívá v odečítání času z chronometrů umístěných pod oběma kyvadly. V okamžiku, kdy je výchylka kyvadla po rozkmitání opět nulová chronometr zastavíme a odečteme přímo modul pružnosti, to v případě použití normované zkušební tyče, nebo čas v sekundách, dle kterého pak výsledný modul zjistíme z tabulek dodávaných s přístrojem. [4]



Obr. 2.10: Schéma uspořádání sympatických kyvadel k měření modulu pružnosti [4/

## 2.6. Přesnosti měření modulu pružnosti

Způsob zjišťování modulu pružnosti z diagramu tahové zkoušky byl sice prvním, ale vyskytují se u něj chyby. Mezi faktory, které ovlivňují chybu měření, patří nepřesnost rozměrů tyče a nepřesnost jejího upnutí. Při prosté trhací zkoušce není menší přesnost výroby vzorku takový problém, ale při přesném měření již ano. Ještě více se na chybě podílí nepřesné upnutí do trhacího stroje. I když trhací stroje mají závěsy upínacích hlav přizpůsobeny tak, aby se tyč upnula přibližně do osy stroje, čímž se zamezí vzniku přidavného namáhání ohybem, ne vždy se to tak podaří. V oblasti malých deformací tak potom vzniká i ohybové napětí, které zvětšuje deformaci. Další chyba měření může vzniknout například nepřesným upnutím přístroje, případně jakýmkoli otřesem při průběhu zkoušky. Zároveň se ještě na chybě může podílet tepelná dilatace od nevyrovnané teploty přílozek a zkušební tyče. [2]

Pokud se měření neprovádí s dostatečnou pečlivostí, mohou u jednoho materiálu při více měřeních vzniknout odchylky až  $\pm 2\%$  nebo i více. [2]

Statické metody určování modulu pružnosti vykazují výsledky nižší než metody dynamické. Rozdíl je pravděpodobně dán tím, že statické zkoušky probíhají při větších napětích, která leží nad fyzikální mezí pružnosti. U ocelí při normální teplotě jsou rozdíly malé, ale rostou při větších teplotách. Zkoušky za vyšších teplot jsou velmi ovlivněny podmínkami, ve kterých probíhají. Hlavní vliv mají rychlost provádění zkoušky, strukturní stabilita kovu, velikost zkoušeného vzorku, přesnost udržování teploty s ohledem na teplo relaxační apod. [2]

## 2.7. Způsoby ovlivnění velikosti modulu pružnosti v tahu

### a) Vliv uhlíku a dalších přísad na modul pružnosti u ocelí

Modul pružnosti klesá u vyžíhané ocele rovnoměrně zhruba o 5000 MPa na 1% uhlíku, takže vlivem uhlíku se modul zmenšuje.

Při obvyklých malých přísadách se modul pružnosti mění jen málo. Mangan, chrom a molybden ho nepatrně zvětšují, kdežto křemík, hliník a nikl ho částečně zmenšují. Při větších přísadách je však vliv vyšší. [2]

Pro ocel uvažujeme hodnotu modulu pružnosti v tahu  $2,1 \cdot 10^5$  MPa. Přídavkem 20% niklu hodnota klesne na cca  $1,8 \cdot 10^5$  MPa, zatímco 13% chromu ji zvýší na zhruba  $2,2 \cdot 10^5$  MPa. [2]

Austenitické ocele mají modul pružnosti nižší. Niklové ocele dosahují nejnižších hodnot E při koncentraci 40% Ni (cca  $1,35 \cdot 10^5$  MPa), při dalším zvýšení obsahu Ni modul roste. [2]

U některých kovů může modul pružnosti také ovlivnit jemnost krystalizace. Hrubší zrno způsobuje snížení modulu, u obvyklých ocelí je však tento jev podřadný. [2]

### b) Vliv vnitřního pnutí na modul pružnosti

Jakékoliv vnitřní pnutí modul pružnosti snižuje. Nezáleží na příčině vzniku pnutí (tvářením, kalením, případně jiným způsobem). [2]

### c) Vliv tváření za studena na modul pružnosti

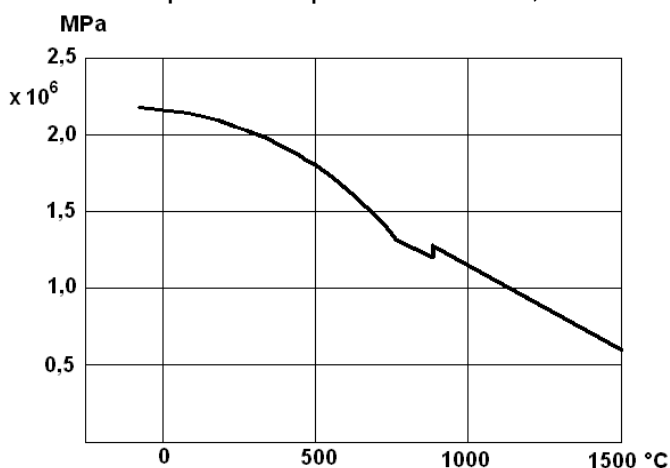
Již po slabém tváření nastává poměrně rychlý pokles modulu pružnosti. Pokles je výraznější při jednosměrném tahu než po válcování nebo tažení průvlakem. Po tváření silnějším pak modul pružnosti klesá jen zvolna a rovnoměrně. [2]

### d) Vliv tepelného zpracování na modul pružnosti

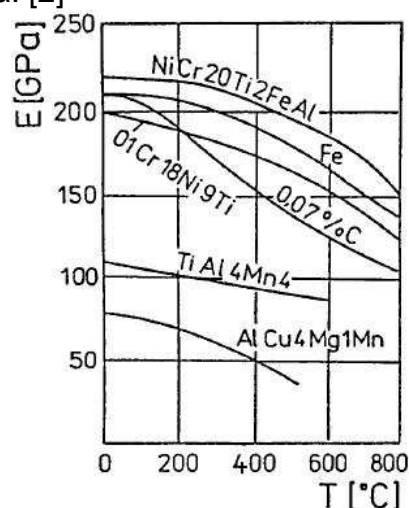
Kalená ocel má modul pružnosti nejmenší. Následným popuštěním se modul zase zvýší. To znamená, že například ocel tepelně zušlechťená, která se po kalení ohřála na 600 °C, čímž se odstranilo vnitřní pnutí, má modul pružnosti podobný vyžíhanému stavu. [2]

### e) Vliv teploty na modul pružnosti

Pokud se teplota pohybuje v rozmezí blízkém normálním teplotám (-50 až 100 °C), tak se dá teplotní závislost považovat za přímkovou. Při vyšších teplotách však tato závislost neplatí – pokles modulu se zrychluje. Na obrázku 2.11 je zobrazen průběh modulu pružnosti čistého železa v závislosti na teplotě. Patrný je tam zrychlující se pokles modulu za vyšších teplot, který se nejvíce projevuje v oblasti kolem teploty  $A_2$ . Zlom na obrázku představuje Curieho bod. Při přeměně mřížky  $\beta$ - $\gamma$  modul pružnosti stoupne a má pak v železe  $\gamma$  menší teplotní součinitel, než v železe  $\alpha$ . [2]

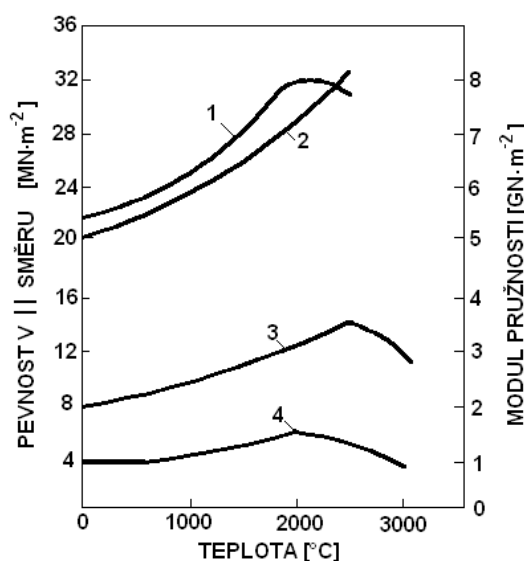


Obr. 2.11: Změny modulu pružnosti s teplotou /2/



Obr. 2.12: Teplotní závislost modulu pružnosti různých materiálů /2/

Zajímavým materiálem je elektroodový grafit, u kterého jako jediného modulu pružnosti, spolu s pevností, při ohřevu roste a to až do teploty 2300 °C (viz obr. 2.13). Tyto jevy jsou vysvětlovány procesy, které souvisí s odstraňováním strukturních vad. [8]



Obr. 2.13 : Závislost mechanických vlastností elektroodového grafitu na teplotě (1 - modul pružnosti, 2 - pevnost v tlaku, 3 - pevnost v ohybu, 4 -pevnost v tahu) /8/



### 3. Experimentální část

Experimentální část této bakalářské práce se zaměřuje na měření modulu pružnosti v tahu. Úkolem je zjistit, jak se mění velikost modulu při různých stupních předdeformace u zkoušených materiálů, které jsou dále představeny. K měření byl použit trhací stroj s přídavným průtahoměrem, ovládaný pomocí počítače. Cílem práce je ověření vlivu tváření za studena na modul pružnosti dle kapitoly 2.7. Vyhodnocení výsledků bylo provedeno pomocí softwaru OriginPro 8. Měření byla zhotovena v prostorách laboratoří katedry strojírenské technologie.

#### 3.1. Měřené materiály

K měření byly použity tři druhy materiálů. Vybrány a hodnoceny byly:

##### Hlubokotažný ocelový materiál DC05

Hodnota modulu pružnosti v tahu tohoto materiálu dle jeho normy je  $210\,000\text{ MPa}$ . Jedná se o nízkouhlíkovou, nelegovanou, jakostní ocel válcovanou za studena. Materiál je vhodný k tváření za studena, k středně hlubokému tažení, lakování nebo pokovování v tavenině i potisku. Používá se ve strojírenství.

##### Hliníkový materiál AW-5182

Hodnota modulu pružnosti v tahu tohoto materiálu dle jeho normy je  $70\,000\text{ MPa}$ . Je to materiál středně pevný, velmi dobře chemicky odolný, nevytvrzovatelný, velmi dobře odolný vůči korozi. Používá se na středně namáhané konstrukce, které mají odolávat korozi a mořské vodě (např. potrubí nebo nádoby na tekutiny pracující při tlaku do  $1,6\text{ MPa}$ ). Dále se používá v potravinářském a chemickém průmyslu, pro vnitřní a vnější architekturu nebo také pro stavbu vozidel a plavidel.

##### Korozivzdorný materiál Nirosta 4301

Hodnota modulu pružnosti v tahu tohoto materiálu dle jeho normy je  $200\,000\text{ MPa}$  při  $20\text{ °C}$ . Protože tento materiál obsahuje mírné množství uhlíku, je částečně citlivý na korozi, které odolává ve většině prostředí a to za předpokladu, že v něm není velká koncentrace chloridu sodného. Materiál není doporučován používat v prostředích, kde se setkává s mořskou vodou. Používá se v automobilovém, chemickém nebo potravinářském průmyslu, dále také při stavbě budov a konstrukcí.

#### 3.2. Zkušební tyč

Zkušební tyč odpovídala normalizovanému tvaru tyče pro tahovou zkoušku dle normy ČSN EN ISO 6892-1 s obdélníkovým průřezem (obr. 3.1).



Obr. 3.1: Zkušební tyč použitá pro měření modulu pružnosti v tahu.

### 3.3. Průběh zkoušky

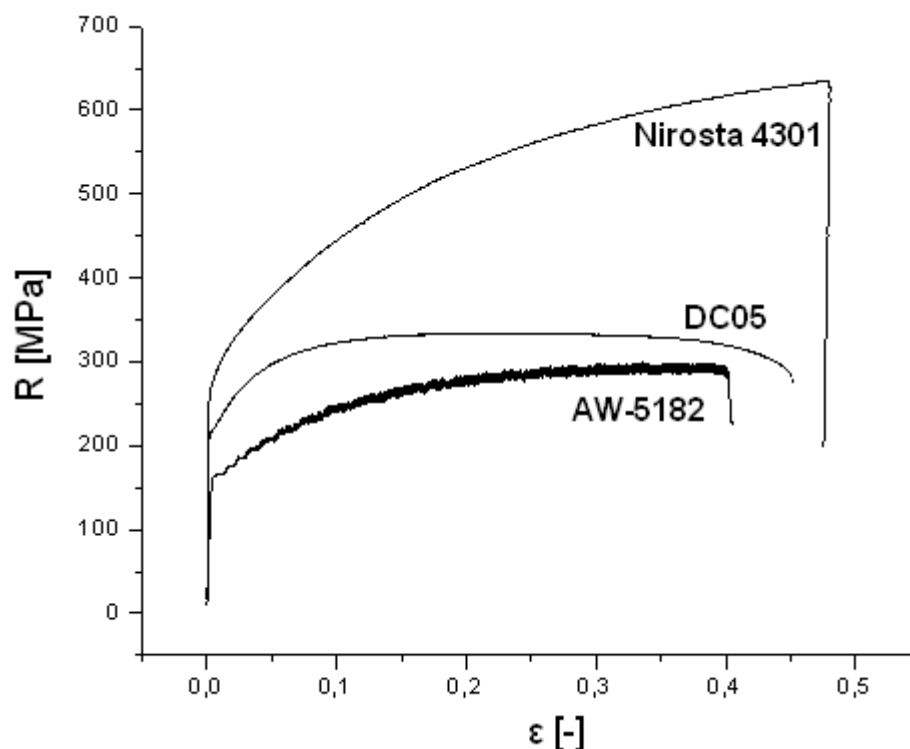
1) Prvním krokem byla příprava vzorků měřených materiálů. Na strojních nůžkách byly nastříhány kusy materiálů, které svou velikostí zaručovaly možnost vystřížení tvaru zkušební tyče. Toho bylo docíleno na lisu s přídatným střížným nástrojem.

2) Poté byla pro všechny 3 měřené materiály vykonána tahová zkouška na universálním statickém trhacím stroji TIRAtest 2300. Zkouška spočívala v upnutí vzorku do čelistí stroje a následném přidělení digitálního průtahoměru MFN 400 na upnutý vzorek. Průtahoměr pak po zahájení zkoušky snímá aktuální prodloužení vzorku a naměřená data přenáší do počítače, kde výrobcem dodávaný software ihned ukazuje průběh zkoušky.



Obr. 3.2: Trhací stroj TIRAtest 2300 použitý k měření.

3) Tahové zkoušky byly zhotoveny ke zjištění deformace, při které dojde k přetržení tyče. Na základě těchto výsledků pak byly stanoveny hodnoty předdeformace pro samotné měření modulu pružnosti. Z obr. 3.3 je patrné, že všechny zkoušené materiály se dají předdeformovat na hodnoty, kdy poměrné prodloužení dosahuje hodnot 0,06; 0,12 a 0,18 (6, 12 a 18%), aniž by došlo k porušení materiálu. Tyto hodnoty pak znamenají okamžité prodloužení na průtahoměru 3 mm, resp. 6 mm a 9 mm.



Obr. 3.3: Diagramy tahových zkoušek pro všechny měřené materiály pro určení stupňů předdeformace materiálů.

4) Následovalo vytvoření různých stupňů předdeformace materiálu. Vzorek byl upnut do universálního trhačího stroje. Na vzorek byl přidělán průtahoměr MFN 400, který ihned ukazuje průběh zkoušky. Předdeformace bylo docíleno tak, že zkouška byla ukončena v momentě, kdy poměrné prodloužení dosahovalo hodnoty 6%, resp. 12% a 18%. Od každého materiálu bylo připraveno celkem 12 vzorků – 3 ks bez deformace a 3 ks s poměrným prodloužením 6 %, resp. 12% a 18%.

5) Označení vzorků: každý vzorek byl označen dvěma čísly, ve stylu např. 0\_1. První číslo znamená, o kolik mm byl vzorek předdeformován, druhé číslo znamená číslo vzorku. Takže např. vzorek 6\_2 byl natažen o 6 mm (12% poměrného prodloužení) a je to druhý ze tří takových vzorků.

6) Dále bylo provedeno měření všech zkušebních kusů a to pomocí digitálního mikrometru Mitutoyo. Zaznamenány byly rozměry tloušťky a šířky vzorků, hodnoty jsou uvedeny v tabulkách 3.4, 3.5, 3.6:

Tab. 3.4: Rozměry vzorků hlubokotažného materiálu DC05

Vzorek	0_1	0_2	0_3	3_1	3_2	3_3
$l_0$ [mm]	50	50	50	50	50	50
$t_0$ [mm]	0,706	0,703	0,708	0,707	0,706	0,694
$b_0$ [mm]	20,080	20,063	20,071	19,343	19,351	19,345
Vzorek	6_1	6_2	6_3	9_1	9_2	9_3
$l_0$ [mm]	50	50	50	50	50	50
$t_0$ [mm]	0,691	0,696	0,689	0,673	0,685	0,681
$b$ [mm]	18,672	18,665	18,675	18,088	17,998	18,025

Tab. 3.5: Rozměry vzorků hliníkového materiálu AW-5182

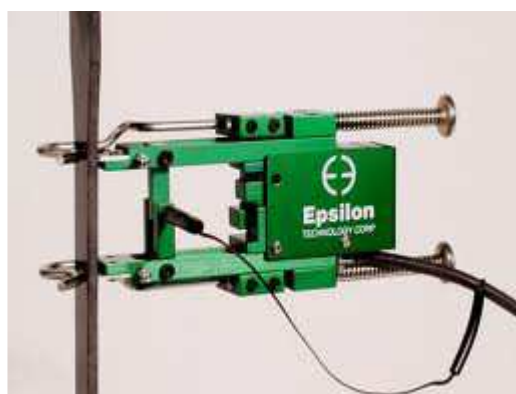
Vzorek	0_1	0_2	0_3	3_1	3_2	3_3
$l_0$ [mm]	50	50	50	50	50	50
$t_0$ [mm]	1,515	1,516	1,515	1,480	1,476	1,485
$b_0$ [mm]	20,053	20,068	20,055	19,682	19,679	19,676
Vzorek	6_1	6_2	6_3	9_1	9_2	9_3
$l_0$ [mm]	50	50	50	50	50	50
$t_0$ [mm]	1,434	1,441	1,436	1,385	1,380	1,376
$b_0$ [mm]	19,282	19,231	19,265	18,776	18,814	18,786

Tab. 3.6: Rozměry vzorků materiálu Nirosta 4301

Vzorek	0_1	0_2	0_3	3_1	3_2	3_3
$l_0$ [mm]	50	50	50	50	50	50
$t_0$ [mm]	0,504	0,503	0,506	0,499	0,495	0,499
$b_0$ [mm]	20,124	20,122	20,117	19,582	19,581	19,580
Vzorek	6_1	6_2	6_3	9_1	9_2	9_3
$l_0$ [mm]	50	50	50	50	50	50
$t_0$ [mm]	0,483	0,485	0,485	0,471	0,471	0,476
$b_0$ [mm]	19,051	19,063	19,039	18,542	18,560	18,542

Pozn.:  $l_0$ ...délka měřené části vzorku,  $t_0$ ...tloušťka vzorku,  $b_0$ ...šířka vzorku

7) Samotné měření modulu pružnosti v tahu bylo provedeno obdobně jako ve kroku 4). Vzorek byl upnut do trhačího stroje, dále na něj byl přidělán průtahoměr Epsilon Tech 3542 (obr. 3.7). Zkouška byla pro každý vzorek ukončena, když prodloužení měřené průtahoměrem dosáhlo hodnoty 1 mm. Software zaznamenal data průběhu zkoušky – působící sílu a prodloužení vzorku. Tato data pak byla použita pro zpracování a vyhodnocení výsledků.



Obr. 3.7: Průtahoměr Epsilon Tech 3542.

### 3.4. Zpracování výsledků zkoušky

#### 3.4.1. Zjištění hodnot $R$ a $\varepsilon$

Software trhačího stroje zaznamenal zatěžující sílu a prodloužení způsobené zatížením pro každý vzorek všech materiálů. Pro další zpracování výsledků bylo nutno zhotovit diagramy napětí-poměrné prodloužení ( $R$ - $\varepsilon$ ). K výpočtu zmíněných hodnot byly použity následující vzorce:

Napětí  $R$  bylo vypočítáno dle vztahu:

$$R = \frac{F}{S_0} \quad (3.1)$$

kde  $R$  ... napětí [MPa]  
 $F$  ... zatěžující síla [N]  
 $S_0$  ... původní průřez vzorku [mm<sup>2</sup>]

Původní průřez vzorku se vypočítal dle vztahu:

$$S_0 = b_0 \cdot t_0 \quad (3.2)$$

kde  $S_0$  ... původní průřez vzorku [mm<sup>2</sup>]  
 $b_0$  ... původní šířka vzorku [mm]  
 $t_0$  ... původní tloušťka vzorku [mm]

Poměrné prodloužení bylo určeno ze vztahu:

$$\varepsilon = \frac{l}{l_0} \quad (3.3)$$

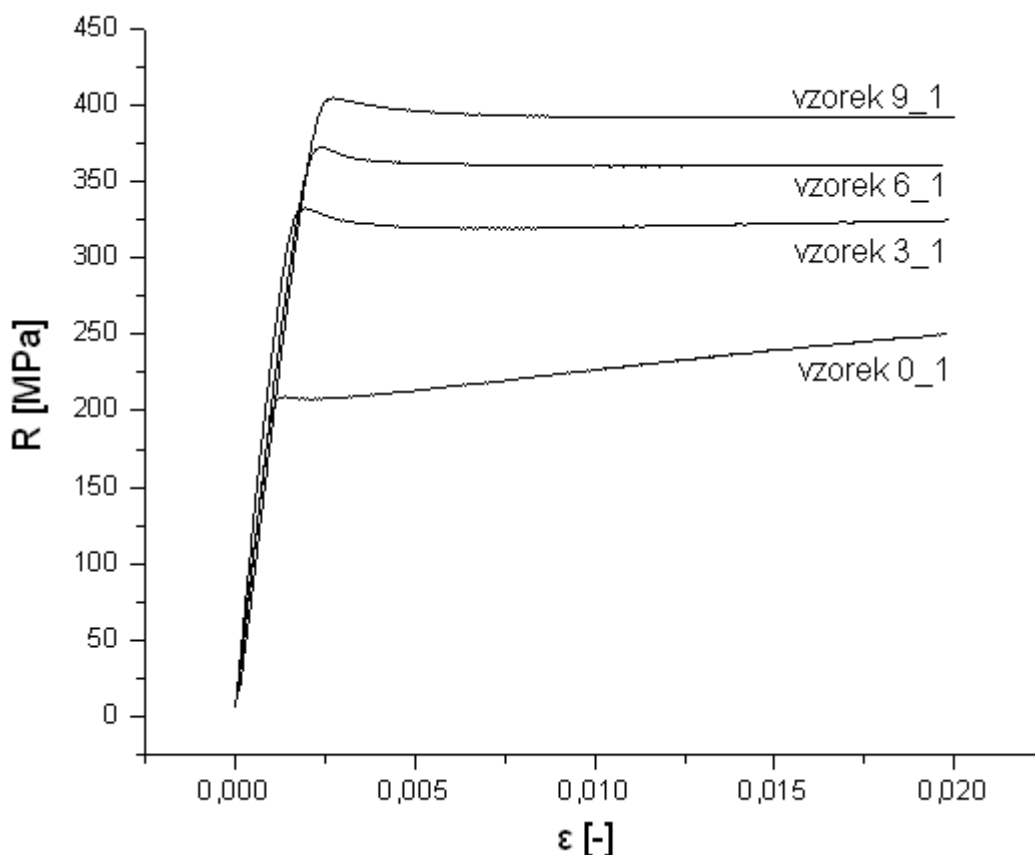
kde  $\varepsilon$  ... poměrné prodloužení vzorku [-]  
 $l$  ... prodloužení vzorku [mm]  
 $l_0$  ... původní délka vzorku [mm]

Hodnoty zatěžující síly  $F$  a prodloužení  $l$  byly získány pomocí softwaru, který je součástí trhačího stroje. Hodnoty pak byly přeneseny do softwaru Microsoft Excel. Jejich ukázka pro vzorek 0\_1 hlubokotažného materiálu DC05 je uvedena v příloze č. 1. Rozměry šířky, tloušťky a délky vzorků jsou pro jednotlivé materiály uvedeny v tabulkách 3.4, 3.5 a 3.6.

Dalším krokem bylo vypočítání velikosti napětí  $R$  a poměrného prodloužení  $\varepsilon$ , čehož bylo docíleno pomocí vzorců (3.1), (3.2) a (3.3). Ze získaných výsledků pak byl v softwaru OriginPro 8 vytvořen diagram jejich závislosti.

Tento postup pak byl proveden pro všechny vzorky všech zkoušených materiálů.

### 3.4.2. Hlubokotažný materiál DC05

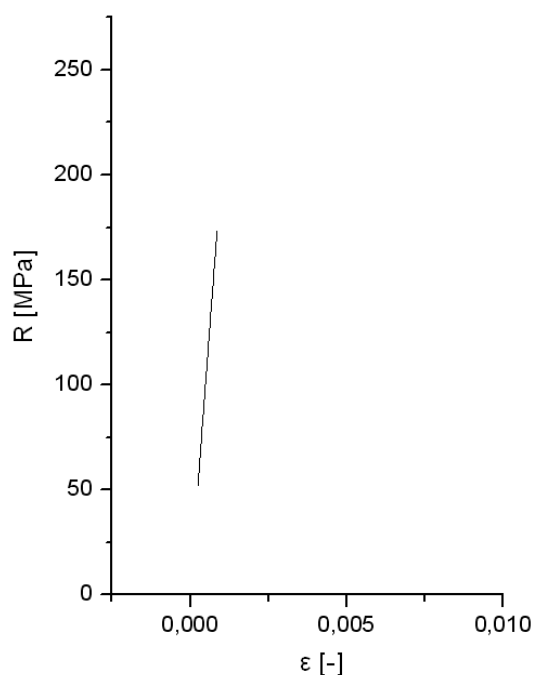


Obr.: 3.8 Závislost napětí  $R$  na poměrném prodloužení  $\varepsilon$  vzorků 0\_1, 3\_1, 6\_1 a 9\_1 hlubokotažného materiálu DC05.

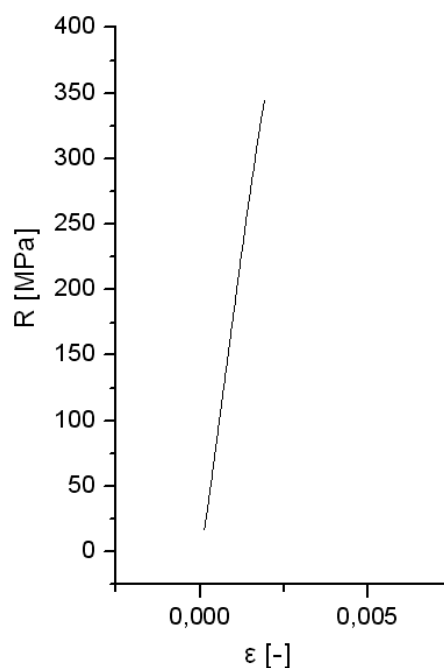
Modul pružnosti v tahu se z diagramu trhací zkoušky dá určit na základě sklonu přímkové části diagramu, kde platí Hookův zákon, napětí je tedy přímo úměrné deformaci. Z toho vyplývá, že dále bylo nutno tuto přímkovou část diagramu oddělit od zbytku křivky. Na obr. 3.8 jsou uvedeny diagramy  $R$ - $\varepsilon$  materiálu DC05 všech stupňů předdeformace zkušebních tyčí.

K získání hodnot modulu pružnosti v tahu pak byly použity dva způsoby. Prvním bylo omezení křivky u všech vzorků na rozmezí napětí 50 – 175 MPa. Toto rozmezí bylo zvoleno z důvodu, že v něm všechny vzorky vykazují ještě přímkový průběh (obr. 3.9). Tento postup je dále označován jako způsob 1.

Druhou metodou bylo omezení hodnot napětí na individuální rozmezí u každého vzorku, které bylo stanoveno podle minimální až maximální hodnoty napětí, kde vzorek vykazuje ještě přímkový průběh. U na obr. 3.8 zobrazených vzorků jsou tato rozmezí přibližně: vzorek 0\_1 - 0 až 190 MPa, vzorek 3\_1 – 0 až 290 MPa, vzorek 6\_1 – 0 až 340 MPa, vzorek 9\_1 – 0 až 350 MPa (obr. 3.10). Tento postup je dále označován jako způsob 2.



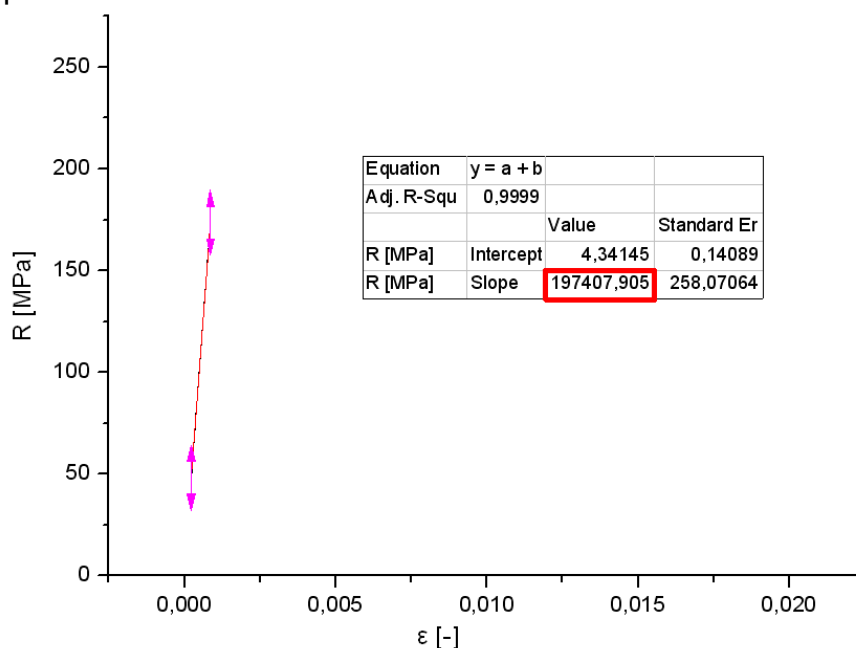
Obr. 3.9: Příklad lineární části diagramu vzorku 0\_1, rozsah 50 až 175 MPa, pro určení E způsobem, kdy je rozsah hodnot R pro všechny vzorky stejný.



Obr. 3.10: Příklad lineární části diagramu vzorku 9\_1, rozsah 0 – 350 MPa, způsobem, kdy je rozsah hodnot R odlišný pro každý vzorek.

### 3.4.2.1. Určení modulu E směrnici přímky

Oddělená část diagramu byla v softwaru OriginPro 8 proložena přímkou, software následně vyhodnotil její směrnici a určil tak velikost modulu pružnosti v tahu.



Obr. 3.11: Určení modulu pružnosti proložením části diagramu přímkou vzorku 0\_1 materiálu DC05.

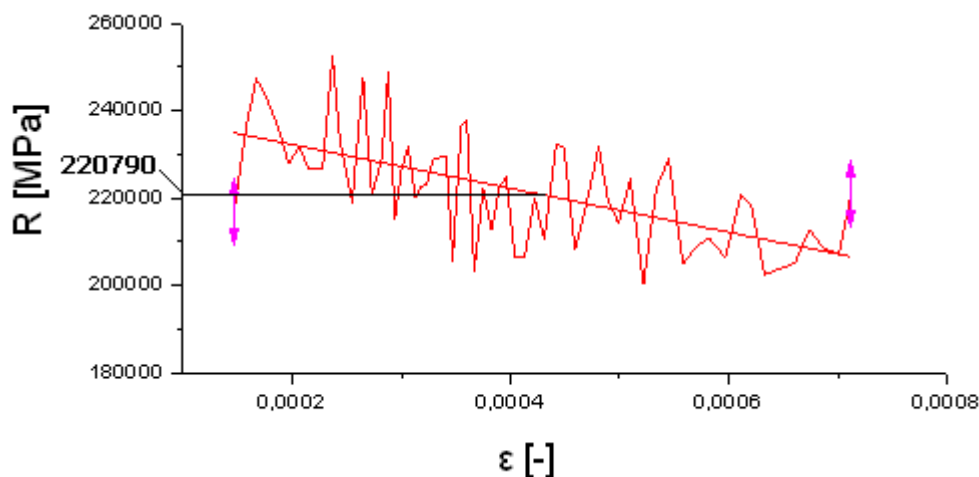
Stejný postup byl proveden pro všechny vzorky materiálu DC05, a to pro obě rozmezí diagramu R- $\epsilon$ . Výsledky zkoušky jsou uvedeny v tabulce 3.12.

Tab. 3.12: Výsledky měření modulu pružnosti materiálu DC05 – vyhodnocení pomocí směrnice přímky

	1. způsob	2. způsob		1. způsob	2. způsob
vzorek	E [MPa]	E [MPa]	vzorek	E [MPa]	E [MPa]
0_1	197408	197898	6_1	200930	190627
0_2	210188	210555	6_2	195316	183608
0_3	202039	202457	6_3	213476	191611
Ø	<b>203212</b>	<b>203637</b>	Ø	<b>203241</b>	<b>188615</b>
3_1	239917	232445	9_1	193124	187363
3_2	218420	205114	9_2	197437	182552
3_3	183411	176671	9_3	202394	189529
Ø	<b>213916</b>	<b>204743</b>	Ø	<b>197652</b>	<b>186481</b>

#### 3.4.2.2. Určení modulu E derivací

Další metodou zjištění hodnoty E bylo provedení derivace přímkové části diagramu R- $\epsilon$  v softwaru OriginPro 8, následné proložení výsledné derivační křivky přímkou a zjištění střední hodnoty napětí (obr. 3.13). Stejně jako u určování směrnice přímky byla i zde použita dvě rozmezí diagramu R- $\epsilon$ . Tato rozmezí odpovídala rozmezím v předchozím případě.



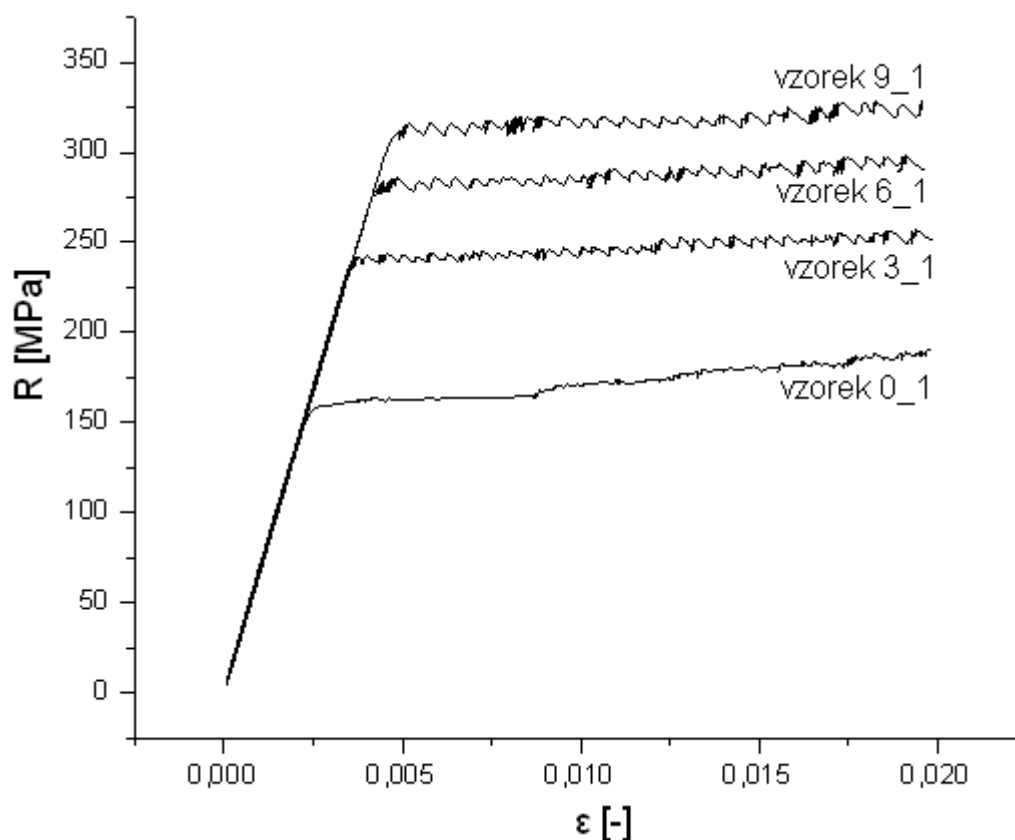
Obr. 3.13: Určení modulu pružnosti E derivací přímkové části diagramu vzorku 3\_2 v rozmezí hodnot napětí 50 – 175 MPa.



Tab. 3.14: Výsledky měření modulu pružnosti materiálu DC05 – vyhodnocení pomocí derivace

	1. způsob	2. způsob		1. způsob	2. způsob
vzorek	E [MPa]	E [MPa]	vzorek	E [MPa]	E [MPa]
0_1	197355	198044	6_1	202178	194831
0_2	210607	210742	6_2	196089	188634
0_3	200794	201796	6_3	212057	196906
<b>Ø</b>	<b>202919</b>	<b>203527</b>	<b>Ø</b>	<b>203441</b>	<b>193457</b>
3_1	239791	233013	9_1	193645	193293
3_2	220790	210814	9_2	197538	189328
3_3	185077	184401	9_3	201848	194118
<b>Ø</b>	<b>215219</b>	<b>209409</b>	<b>Ø</b>	<b>197677</b>	<b>192246</b>

### 3.4.3. Hliníkový materiál AW-5182



Obr.: 3.15: Závislost napětí  $R$  na poměrném prodloužení  $\epsilon$  vzorků 0\_1, 3\_1, 6\_1 a 9\_1 hliníkového materiálu AW-5182.

Stejně jako u hlubokotažného materiálu DC05, bylo i u tohoto materiálu nutné omezit výsledné křivky diagramů  $R$ - $\epsilon$  na rozmezí napětí  $R$ , kde ještě platí přímková část. I zde bylo omezení provedeno dvěma způsoby.

Jako způsob 1 je označováno rozmezí od 25 do 125 MPa, kde zatížení bylo přímo úměrné deformaci u všech vzorků.

Způsob 2 pak reprezentuje individuální omezení každého vzorku tak, aby rozsah hodnot stále ještě představoval přímkový charakter (hodnoty od minima do maxima přímkové části). U na obr. 3.15 zobrazených vzorků jsou tato rozmezí přibližně: vzorek 0\_1 - 0 až 140 MPa, vzorek 3\_1 - 0 až 220 MPa, vzorek 6\_1 - 0 až 260 MPa, vzorek 9\_1 - 0 až 390 MPa.

#### 3.4.3.1. Určení modulu $E$ směrníci přímky

Vyhodnocení bylo provedeno stejně jako u materiálu DC05, tzn. že oddělená část diagramu byla v softwaru OriginPro 8 proložena přímkou, software pak vyhodnotil její směrnici a určil tak velikost modulu pružnosti v tahu.

Tab. 3.16: Výsledky měření modulu pružnosti hliníkového materiálu AW-5182  
- vyhodnocení pomocí směrnice přímky

	1. způsob	2. způsob		1. způsob	2. způsob
vzorek	E [MPa]	E [MPa]	vzorek	E [MPa]	E [MPa]
0_1	67256	67548	6_1	66649	66167
0_2	67639	67595	6_2	66036	65831
0_3	69370	68732	6_3	66624	66324
<b>Ø</b>	<b>68088</b>	<b>67958</b>	<b>Ø</b>	<b>66436</b>	<b>66107</b>
3_1	67283	67231	9_1	66721	66545
3_2	65740	65548	9_2	68319	67483
3_3	65700	65921	9_3	66979	66752
<b>Ø</b>	<b>66241</b>	<b>66233</b>	<b>Ø</b>	<b>67340</b>	<b>66927</b>

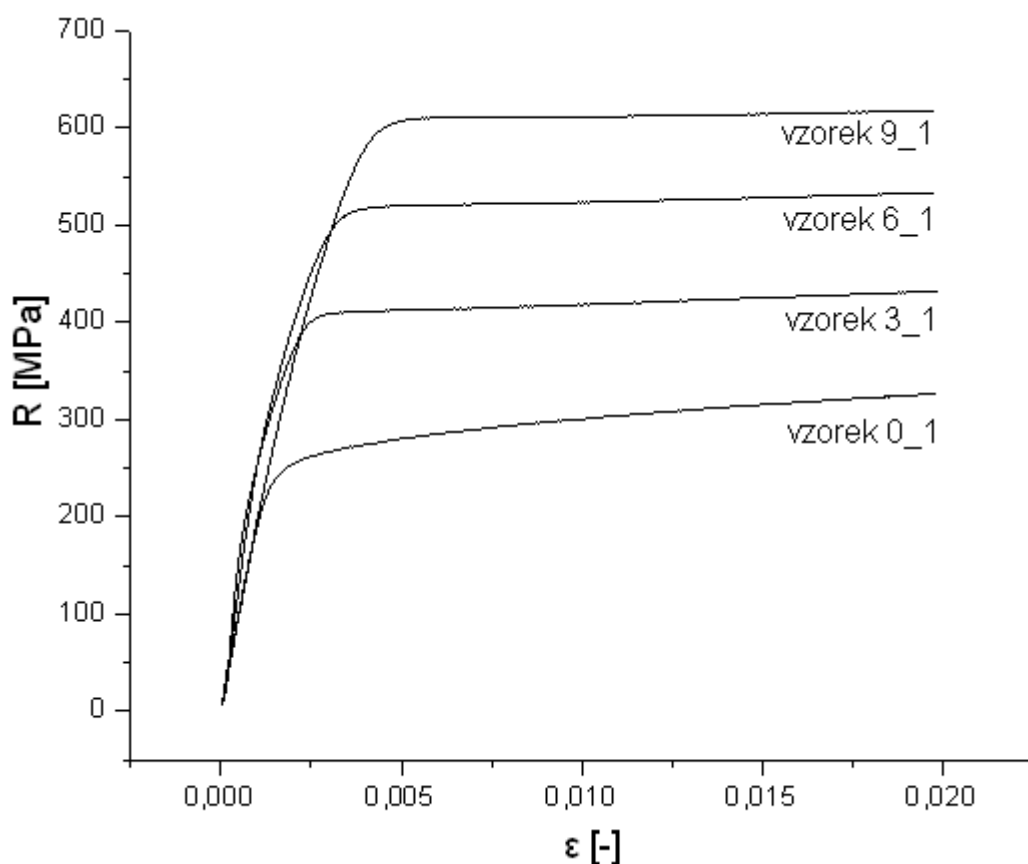
### 3.4.3.2. Určení modulu E derivací

Další metodou vyhodnocení velikosti modulu pružnosti v tahu bylo provedení derivace přímkové části, proložení přímkou a zjištění střední hodnoty napětí, tedy stejný postup jako u materiálu DC05. Opět bylo hodnocení provedeno pro oba způsoby oddělení přímkové části.

Tab. 3.17: Výsledky měření modulu pružnosti hliníkového materiálu AW-5182  
- vyhodnocení pomocí derivace

	1. způsob	2. způsob		1. způsob	2. způsob
vzorek	E [MPa]	E [MPa]	vzorek	E [MPa]	E [MPa]
0_1	71952	71667	6_1	70803	71614
0_2	71667	71622	6_2	69802	71613
0_3	73236	71826	6_3	70301	71605
<b>Ø</b>	<b>72285</b>	<b>71705</b>	<b>Ø</b>	<b>70302</b>	<b>71611</b>
3_1	71205	72580	9_1	71100	71874
3_2	70431	70897	9_2	72843	72843
3_3	70333	71398	9_3	71061	71912
<b>Ø</b>	<b>70656</b>	<b>71625</b>	<b>Ø</b>	<b>71668</b>	<b>72210</b>

### 3.4.4. Materiál Nirosta 4301



Obr.: 3.18: Závislost napětí  $R$  na poměrném prodloužení  $\epsilon$  vzorků 0\_1, 3\_1, 6\_1 a 9\_1 materiálu Nirosta 4301.

I u tohoto materiálu bylo nejprve nutné oddělit přímkovou část diagramu  $R$ - $\epsilon$ . Toho bylo opět docíleno dvěma způsoby.

Prvním způsobem je nastavení rozmezí hodnot napětí  $R$  od 50 do 200 MPa, kde dle obrázku 3.18 mají přímkový průběh všechny zkoušené vzorky.

Jako způsob č. 2 je označena metoda, kdy každý vzorek má své individuální rozmezí, od minimální do maximální hodnoty  $R$ , kde má křivka ještě přímkový charakter. U na obrázku zobrazených vzorků jsou tato rozmezí přibližně: vzorek 0\_1 - 0 až 200 MPa, vzorek 3\_1 - 0 až 350 MPa, vzorek 6\_1 - 0 až 450 MPa, vzorek 9\_1 - 0 až 530 MPa

#### 3.4.4.1. Určení modulu $E$ směrnici přímky

Vyhodnocení bylo provedeno stejně jako u předchozích materiálů, tzn. že oddělená část diagramu byla v softwaru OriginPro 8 proložena přímkou, software pak vyhodnotil její směrnici a určil tak velikost modulu pružnosti v tahu.

Tab. 3.19: Výsledky měření modulu pružnosti materiálu Nirosta 4301 - vyhodnocení pomocí směrnice přímky

	1. způsob	2. způsob		1. způsob	2. způsob
vzorek	E [MPa]	E [MPa]	vzorek	E [MPa]	E [MPa]
0_1	186717	182816	6_1	277922	183724
0_2	198638	203089	6_2	227179	169080
0_3	268278	263001	6_3	237386	203800
<b>Ø</b>	<b>217878</b>	<b>216302</b>	<b>Ø</b>	<b>247496</b>	<b>185535</b>
3_1	318809	204170	9_1	191404	160066
3_2	285062	195651	9_2	215006	172236
3_3	289494	198820	9_3	187379	159939
<b>Ø</b>	<b>297788</b>	<b>199547</b>	<b>Ø</b>	<b>197930</b>	<b>164080</b>

#### 3.4.4.2. Určení modulu E derivací

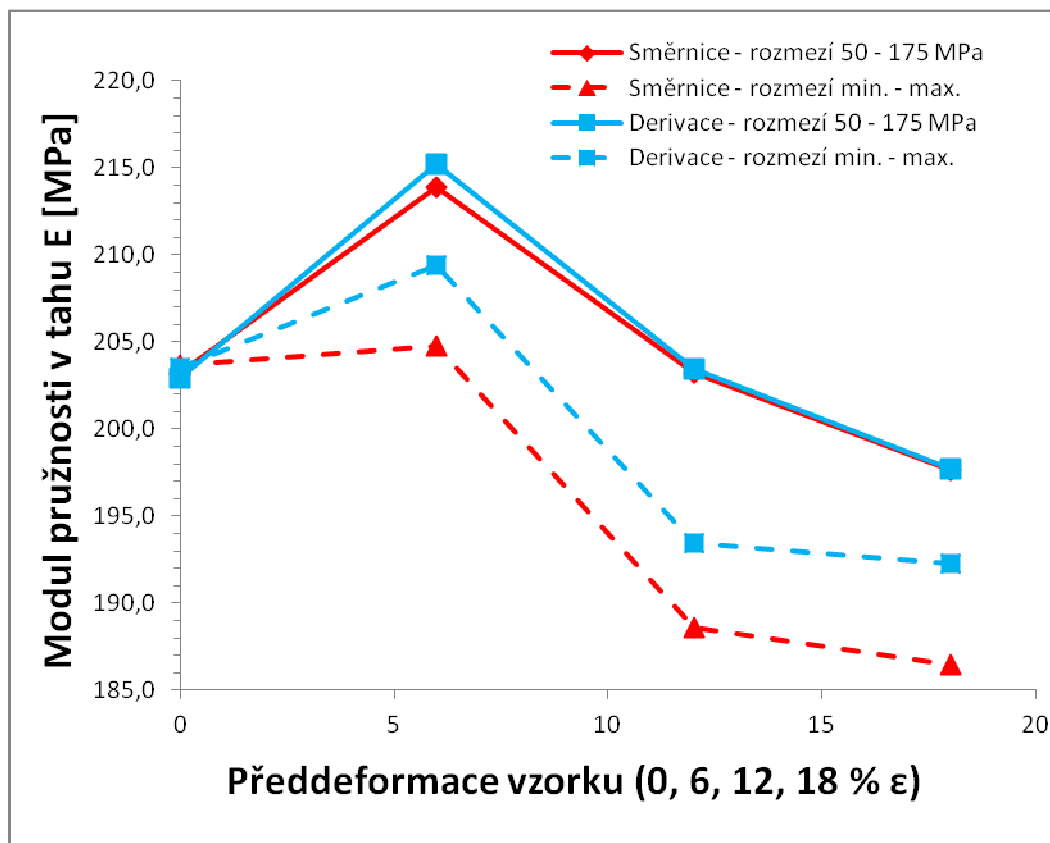
Další metodou vyhodnocení velikosti modulu pružnosti v tahu bylo provedení derivace přímkové části, proložení přímkou a zjištění střední hodnoty napětí, tedy stejný postup jako u předchozích materiálů. Opět bylo hodnocení provedeno pro oba způsoby oddělení přímkové části.

Tab. 3.20: Výsledky měření modulu pružnosti materiálu Nirosta 4301 - vyhodnocení pomocí derivace

	1. způsob	2. způsob		1. způsob	2. způsob
vzorek	E [MPa]	E [MPa]	vzorek	E [MPa]	E [MPa]
0_1	183940	179426	6_1	272612	186386
0_2	200692	203103	6_2	226520	168957
0_3	263000	258618	6_3	241416	200077
<b>Ø</b>	<b>215877</b>	<b>213716</b>	<b>Ø</b>	<b>246849</b>	<b>185140</b>
3_1	313453	223614	9_1	190863	159428
3_2	282410	202700	9_2	214047	170108
3_3	310345	214378	9_3	187043	157654
<b>Ø</b>	<b>302069</b>	<b>213564</b>		<b>197318</b>	<b>162397</b>

### 3.5. Vyhodnocení výsledků zkoušky

#### 3.5.1. Hlubokotažný materiál DC05



Obr. 3.21: Graf změny modulu pružnosti v závislosti na stupni předdeformace hlubokotažného materiálu DC05

##### a) Vyhodnocení výsledků získaných ze směrnice přímky

V grafu 3.21 jsou tyto hodnoty zobrazeny červenou barvou, plná čára pak představuje rozmezí napětí 50 – 175 MPa a čárkovaná čára rozmezí napětí od minima do maxima přímkové části. Z grafu vyplývá, že při prvním stupni předdeformace modul pružnosti v tahu zvýší svou hodnotu. Tento jev potvrzují oba způsoby vyhodnocení výsledků. Při další deformaci již ale velikost modulu  $E$  začne klesat a to sice přibližně na původní hodnotu (rozmezí 50 až 175 MPa), resp. výrazně pod ní (rozmezí min-max). Poslední stupeň předdeformace pak tento trend potvrzuje a oba způsoby zjištění hodnot vykazují velikost modulu pod původní hodnotou.

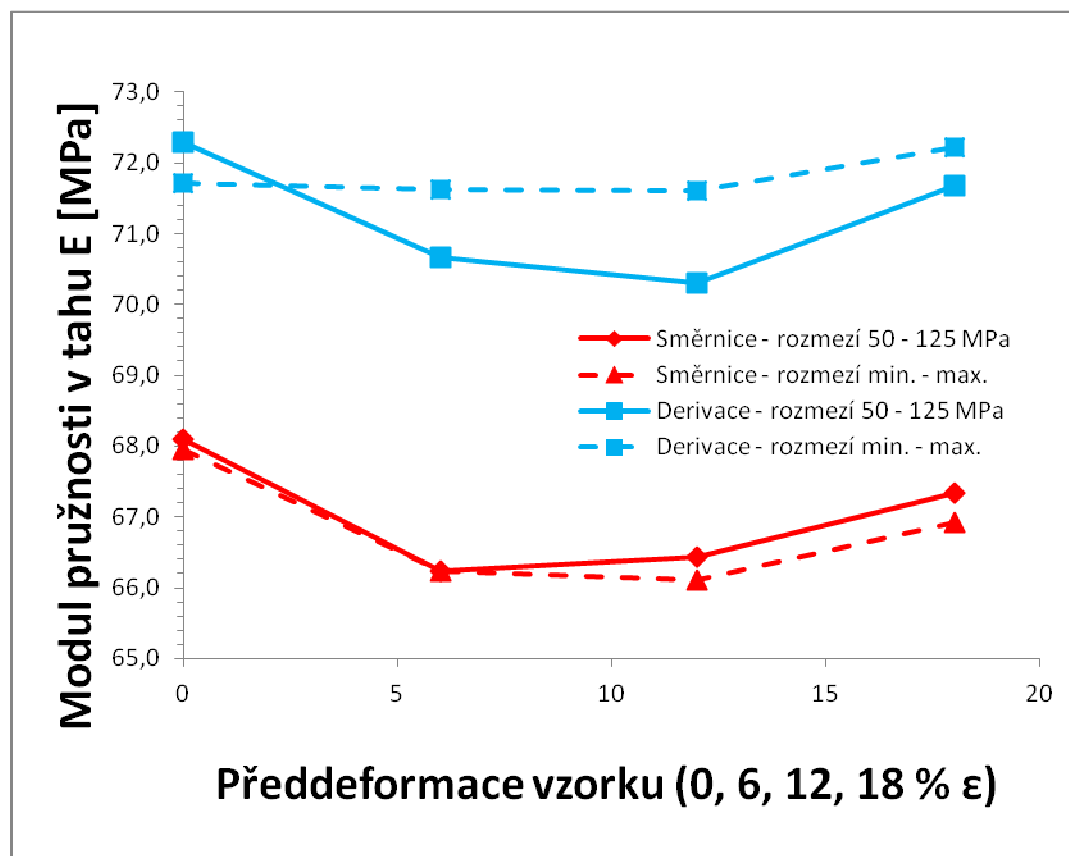
V kapitole 2.7. je uvedeno, že již po slabém tváření za studena dochází k poklesu hodnoty modulu pružnosti v tahu. Při malé předdeformaci (6% poměrného prodloužení) se tento fakt se nepotvrzuje, nicméně v následujících stupních předdeformace již ano.

##### b) Vyhodnocení výsledků získaných z derivace

V grafu 3.21 jsou tyto hodnoty zobrazeny modrou barvou, plná čára pak představuje rozmezí napětí 50 – 175 MPa a čárkovaná čára rozmezí napětí od minima do maxima přímkové části. Na první pohled je z grafu

patrné, že výsledky získané tímto způsobem jsou nepatrně vyšší, průběh hodnot modulu pružnosti (nejprve mírné zvýšení, které je následováno snížením) je však stejný jako u směrnice přímky.

### 3.5.2. Hliníkový materiál AW-5182



Obr. 3.22: Graf změny modulu pružnosti v závislosti na stupni předdeformace hliníkového materiálu AW-5182

#### a) Vyhodnocení výsledků získaných ze směrnice přímky

V grafu 3.22 jsou tyto hodnoty zobrazeny červenou barvou, plná čára pak představuje rozmezí napětí 50 – 125 MPa a čárkovaná čára rozmezí napětí od minima do maxima přímkové části. Z grafu je jasně vidět, že obě rozmezí hodnot vykazují takřka totožné výsledky. Vliv prvního stupně předdeformace se projeví tak, že velikost modulu pružnosti v tahu klesne na hodnotu, kterou si přibližně zachová i při druhém stupni deformace. Zajímavý vývoj pak nastává v posledním kroku měření, kdy se hodnota modulu E zvýší a to na hodnotu zhruba poloviční mezi původním stavem a prvním stupněm předdeformace.

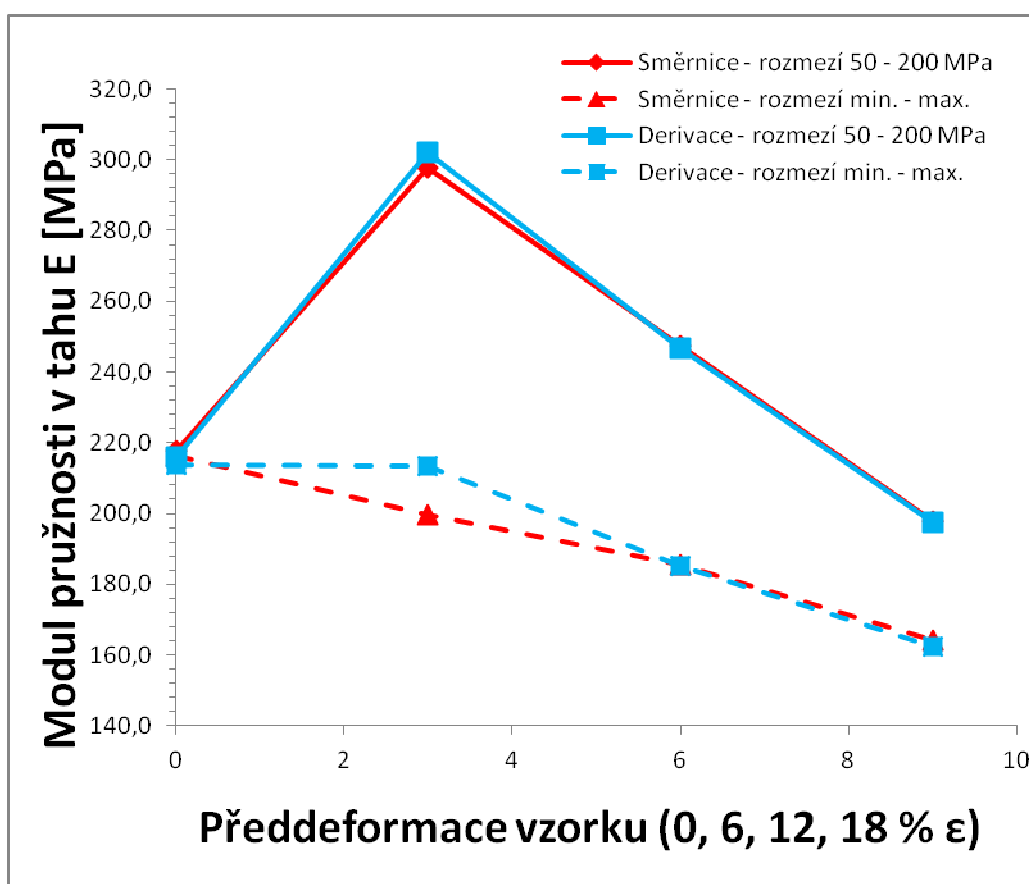
U tohoto materiálu se tak potvrdilo tvrzení z kapitoly 2.7, že při tváření za studena ihned dochází k poklesu modulu pružnosti v tahu.

#### b) Vyhodnocení výsledků získaných z derivace

V grafu 3.22 jsou tyto hodnoty zobrazeny modrou barvou, plná čára pak představuje rozmezí napětí 50 – 125 MPa a čárkovaná čára rozmezí napětí od minima do maxima přímkové části. U výsledků zjištěných derivační

metodou je hned patrné, že vykazují vyšší hodnoty modulu pružnosti, než způsob předchozí. Nicméně platí, že velikost modulu E nejprve začne klesat, čímž se potvrdí teoretický předpoklad. I zde však platí, že v posledním kroku se pak modul pružnosti v tahu zvýší, a to na hodnoty přibližně rovné těm původním.

### 3.5.3. Materiál Nirosta 4301



Obr. 3.23: Graf změny modulu pružnosti v závislosti na stupni předdeformace materiálu Nirosta 4301

#### a) Vyhodnocení výsledků získaných ze směrnice přímky

V grafu 3.23 jsou tyto hodnoty zobrazeny červenou barvou, plná čára pak představuje rozmezí napětí 50 – 200 MPa a čárkovaná čára rozmezí napětí od minima do maxima přímkové části. U tohoto materiálu oba způsoby omezení diagramu R-ε vykazují odlišné výsledky. Zatímco rozmezí od minima do maxima potvrzuje předpoklad z teoretické části, že po tváření za studena dojde k poklesu modulu E, omezení rozmezí na 50 až 200 MPa tento fakt vyvrací a to velmi výrazně, protože při prvním stupni dochází k velkému zvýšení velikosti hodnoty modulu pružnosti. Oba způsoby se pak shodují v tom, že po další deformaci modul pružnosti klesá a při posledním stupni měření pak dosahuje hodnot menších než jsou hodnoty výchozí.



**b) Vyhodnocení výsledků získaných z derivace**

V grafu 3.23 jsou tyto hodnoty zobrazeny modrou barvou, plná čára pak představuje rozmezí napětí 50 – 200 MPa a čárkovaná čára rozmezí napětí od minima do maxima přímkové části. Derivační metoda zjištění velikostí modulu  $E$  pak přináší hodnoty obdobné jako metoda směrnicí přímkový, s tím, že při použití omezeného rozmezí napětí jsou téměř totožné a při sledování rozmezí napětí od minima do maxima se liší pouze v prvním stupni deformace, kde vykazuje hodnotu mírně nižší než metoda směrnicí.

#### 4. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo sledování materiálové charakteristiky, modulu pružnosti v tahu, při různých stupních předdeformace materiálu. K zjišťování byly použity normalizované zkušební tyče pro tahovou zkoušku ze tří různých materiálů – hlubokotažná ocel DC05, hliníkový materiál AW-5182 a korozivzdorný materiál Nirosta 4301.

V teoretické části bylo vysvětleno co je to modul pružnosti, jak se dá ovlivnit jeho velikost a následně bylo uvedeno několik statických a dynamických metod jeho měření.

V experimentální části bylo představeno samotné měření a popsán jeho postup. K vyhodnocení výsledků byl použit diagram napětí-poměrné prodloužení ( $R-\epsilon$ ), který byl získán pomocí hodnot naměřených při průběhu zkoušky. Zjištění velikosti modulu pružnosti pak bylo provedeno dvěma způsoby, na dvou různých přímkových částí zmíněného diagramu. Pro každý vzorek tak vznikly celkem čtyři hodnoty E.

U hlubokotažné oceli DC05 bylo zjištěno, že při malé předdeformaci vzorku (6% poměrného prodloužení) nejprve modul pružnosti v tahu E vzroste. Následně ale začne prudce klesat a to v obou dalších měřených stupních předdeformace (12% a 18% poměrného prodloužení). Dá se tedy předpokládat, že při dalším stupni deformace by velikost modulu pružnosti v tahu nadále klesala.

Druhým zkoušeným materiálem byl hliníkový materiál AW-5182, u něhož výsledky měření naznačují vývoj velikosti modulu E mírně odlišný od materiálu DC05. Při prvním kroku (6% poměrného prodloužení) se modul pružnosti snížil. Tuto nižší hodnotu si pak zachoval i při dalším stupni předdeformace (12% poměrného prodloužení). Při posledním měření (18% poměrného prodloužení) se však vrátil přibližně na původní hodnotu. Zde by možná bylo zajímavé provést další měření ke sledování následného průběhu, zda a kdy se modul E začne prudce snižovat, jako tomu bylo u materiálu DC05 a jak to předpokládá teorie.

Korozivzdorný materiál Nirosta 4301 pak poskytuje různé výsledky při použití různých částí diagramu  $R-\epsilon$ . Jako úspěšnější měření budeme brát to, které uvažovalo s rozmezím napětí od minimální do maximální hodnoty. Zmíněné měření totiž potvrdilo předpoklad uvedený v teoretické části, že modul pružnosti při tváření za studena klesá, zatímco vyhodnocení výsledků pomocí omezené části diagramu pro všechny vzorky stejné, vykazovalo nejprve prudký vzrůst a až poté pokles velikosti modulu pružnosti. S určitostí se ale dá konstatovat, že při posledním stupni deformace je velikost modulu pružnosti v tahu menší než původní hodnota, a také se dá předpokládat, že by pokles pokračoval i při dalších měřeních.

Na závěr se dá usoudit, že zvolená metoda měření, provedení tahové zkoušky s přídavným průtahoměrem, byla vhodná. Zejména se to potvrdilo pro materiály DC05 a Nirosta 4301, kde z průběhu měření jasně vyplývá, že velikost modulu pružnosti s postupnou deformací klesá. U hliníkového materiálu AW-5182 již to tolik jasné není. Pro zlepšení přesnosti měření by bylo patrně třeba udělat větší počet měření.

## 5. Seznam použité literatury

- [1] PTÁČEK L. A KOLEKTIV: Nauka o materiálu I. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o, 2003. ISBN 80-7204-283-1
- [2] JAREŠ V.: Základní zkoušky kovů a jejich teorie. Praha: ACADEMIA nakladatelství Československé akademie věd, 1966
- [3] MICHALEC J. A KOLEKTIV: Pružnost a pevnost I. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02359-1
- [4] ZEDNÍK V.: Zkoušení kovů. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1957
- [5] ŠAPOŠNIKOV N.A.: Mechanické zkoušení kovů. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1953
- [6] VELES, P.: Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov, ALFA Bratislava, 1989
- [7] WALLA V.: Zkoušení ocelí a ostatních kovů, Práce – vydavatelstvo ROH, 1952
- [8] KRAUS V.: Tepelné zpracování a slinování – přednášky
- [9] UNČÍK S., ŠEVČÍK P.: Modul pružnosti betónu, Trnava, 2008
- [10] VLACH B., FORET R.: Úloha 12. Mechanické vlastnosti pevných látek (zejména kovů), Ústav materiálových věd a inženýrství, FSI VUT Brno

## **6. Seznam příloh**

Příloha 1: Ukázka hodnot naměřených a vypočítaných pro vzorek 0\_1 materiálu DC05.

Příloha 1: Ukázka hodnot naměřených a vypočítaných pro vzorek 0\_1 materiálu DC05.

Síla [N]	Prodloužení [mm]	R [MPa]	$\varepsilon$ [-]	b [mm]	h [mm]	l [mm]
341,4	0,0051425	24,02488	1,03E-04	0,708	20,071	50
377,9	0,0057575	26,59345	1,15E-04	0,708	20,071	50
417,7	0,0065025	29,39424	1,30E-04	0,708	20,071	50
451,9	0,0070625	31,80095	1,41E-04	0,708	20,071	50
485	0,0076575	34,13025	1,53E-04	0,708	20,071	50
518,2	0,008235	36,46659	1,65E-04	0,708	20,071	50
546,9	0,0087375	38,48626	1,75E-04	0,708	20,071	50
574,5	0,00924	40,42851	1,85E-04	0,708	20,071	50
604,4	0,0097825	42,53263	1,96E-04	0,708	20,071	50
635,3	0,0103225	44,70711	2,06E-04	0,708	20,071	50
661,2	0,010749999	46,52974	2,15E-04	0,708	20,071	50
685	0,0111975	48,20458	2,24E-04	0,708	20,071	50
711,5	0,0116825	50,06943	2,34E-04	0,708	20,071	50
741,3	0,012202499	52,1665	2,44E-04	0,708	20,071	50
....	....	....	....	....	....	....
....	....	....	....	....	....	....
3542,9	0,973369956	249,3197	1,95E-02	0,708	20,071	50
3540,2	0,974562466	249,1297	1,95E-02	0,708	20,071	50
3545,7	0,975847483	249,5168	1,95E-02	0,708	20,071	50
3549,6	0,977244973	249,7912	1,95E-02	0,708	20,071	50
3545,7	0,978437483	249,5168	1,96E-02	0,708	20,071	50
3542,4	0,979609966	249,2845	1,96E-02	0,708	20,071	50
3546,8	0,980877459	249,5942	1,96E-02	0,708	20,071	50
3549	0,982162476	249,749	1,96E-02	0,708	20,071	50
3550,1	0,983447492	249,8264	1,97E-02	0,708	20,071	50
3549,6	0,984752476	249,7912	1,97E-02	0,708	20,071	50
3552,9	0,986074984	250,0234	1,97E-02	0,708	20,071	50
3549,6	0,987230003	249,7912	1,97E-02	0,708	20,071	50
3547,9	0,988460004	249,6716	1,98E-02	0,708	20,071	50

### **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských prav užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnou-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL, v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum: 25.05.2012

Podpis:

### **Declaration**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a license for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact, in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 25.05.2012

Signature: